

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**DESINFECÇÃO ULTRAVIOLETA DE ÁGUA PARA CONSUMO  
ATRAVÉS DE REATOR DE BAIXO CUSTO COM  
ALIMENTAÇÃO FOTOVOLTAICA**

MAURICIO VIVAN GUARNIERI

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
DEZEMBRO/2011

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

**DESINFECÇÃO ULTRAVIOLETA DE ÁGUA PARA CONSUMO  
ATRAVÉS DE REATOR DE BAIXO CUSTO COM  
ALIMENTAÇÃO FOTOVOLTAICA**

MAURICIO VIVAN GUARNIERI

**Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental**

**Orientador**

Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens

FLORIANÓPOLIS, (SC)

DEZEMBRO/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL


**DESINFECÇÃO ULTRAVIOLETA DE ÁGUA PARA CONSUMO ATRAVÉS DE REATOR DE BAIXO  
CUSTO COM ALIMENTAÇÃO FOTOVOLTAICA**


MAURICIO VIVAN GUARNIERI

Trabalho submetido à Banca Examinadora como  
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental-  
TCC II

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens  
(Orientador)

  
MSc Eng. Bruno Segalla Pizzolatti  
(Membro da Banca)

  
Dra Renata Iza Mondardo  
(Membro da Banca)

---

## Resumo

O tratamento de água para consumo pode ser resumido ao processo de desinfecção quando utilizada água de chuva ou de poços, por exemplo, e a radiação ultravioleta é uma opção nestes casos. A energia solar fotovoltaica pode interagir adequadamente com essa solução possibilitando o atendimento de comunidades isoladas. A quantidade de pessoas sem acesso a rede de abastecimento de água e energia elétrica é grande no Brasil, bem como o montante anual gasto com os agravos a saúde resultantes desse quadro. Soluções coletivas para esses casos são onerosas e de difícil implementação. Este trabalho teve por objetivo gerar um modelo matemático do processo de desinfecção proposto, verificar a eficiência através de bioensaios e dimensionar o sistema fotovoltaico capaz de alimentar o reator. O reator UV foi construído com materiais de baixo custo, fácil disponibilidade e montagem. Foram utilizadas basicamente, lâmpadas germicidas, tubos de PVC e chapa de alumínio como material reflexivo. Realizaram-se testes com diferentes vazões e parâmetros de qualidade da água interferentes no processo (turbidez, cor, etc). Buscou-se comparar diferentes configurações e o sistema fotovoltaico foi dimensionado de acordo com as exigências elétricas e hidráulicas resultantes dos testes precedentes. Alcançou-se total desinfecção, com redução de 4 logs em uma água com turbidez de 30 uT e vazão entre 5 e 10 L/min. Concluiu-se assim que águas de melhor qualidade, como de poços, fontes e água de chuva que representam o alvo do projeto, poderiam ser adequadamente utilizadas, resultando em solução viável e rápida para comunidades isoladas.

Palavras-chaves: Desinfecção de água, radiação ultravioleta, sistema solar fotovoltaico isolado.

---

## Abstract

The treatment of drinking water can be summarized to the process of disinfecting if used well or rainwater water, e.g., and ultraviolet radiation is an option in these cases. Photovoltaic solar energy can interact properly with this solution allows for assisting isolated communities. The amount of people without access to water supply and electricity is big in Brazil, as well as the annual amount spent on the health hazards resulting from this framework. Collective solutions to these cases are expensive and difficult to implement. This study aimed to generate a mathematical model of the proposed disinfection process, verify the efficiency through the bioassays and sizing photovoltaic system capable of feeding the reactor. The UV reactor was constructed with materials of low cost, easy availability and installation. Were used primarily germicidal lamps, PVC pipes and sheet aluminum as reflective material. Tests were carried out with different flow rates and water quality parameters interferences in the process (turbidity, color, etc.). We sought to compare different settings and the photovoltaic system was sized according to hydraulic and electrical requirements resulting from previous tests. Total disinfection was achieved with a reduction of 4 logs in water with a turbidity of 30 NTU and flow between 5 and 10 L / min. It is concluded that better quality water, such as from wells, springs and rainwater that represent the target of the project, could be properly used, resulting in fast and viable solution for isolated communities.

**Keywords:** Disinfection of water, ultraviolet radiation, isolated photovoltaic system.

---

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA. ....	10
TABELA 2 - PRINCIPAIS TIPOS DE BATERIAS , APLICAÇÃO E FAIXA DE OPERAÇÃO (AH). (GUIMARÃES, 2004).....	36
TABELA 3 - DADOS DE ENTRADA DO MODELO MATEMÁTICO DE DESINFECÇÃO. AS VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO MODELO TEÓRICO FORAM APRESENTADAS DE FORMA LITERAL. ....	40
TABELA 4 - CONSUMO DIÁRIO DE ENERGIA DE UM SISTEMA ISOLADO .....	49
TABELA 5 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LÂMPADA ULTRAVIOLETA TUBULAR E DIODO EMISSOR DE LUZ, LED. ....	53
TABELA 6 - VARIÁVEIS PRESENTES NO MODELO TEÓRICO E VALORES UTILIZADOS. ....	58
TABELA 7 - RESULTADOS PARA O REATOR SEM VERTEDOR. DATA DA COLETA: 14/9/2011. ....	70
TABELA 8 - RESULTADOS PARA O REATOR COM VERTEDOR. DATA DA COLETA:13/9/2011. ....	71
TABELA 9 - RESULTADOS DO TESTE CONFIRMATIVO USANDO REATOR SEM VERTEDOR. DATA DA COLETA: 22/9/2011. ....	73
TABELA 10 – RESULTADOS DOS ENSAIOS BIOLÓGICOS (REATOR COM VERTEDOR). EFICIÊNCIA EM PORCENTAGEM DE REMOÇÃO.....	73
TABELA 10 - RESULTADOS DE ENSAIOS BIOLÓGICOS REATOR COM VERTEDOR. INDICADOR E. COLI.....	76
TABELA 13 - CONSUMO DE ENERGIA ESPERADO NO SISTEMA.....	81
TABELA 14 - RADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA MENSAL EM FLORIANÓPOLIS (KWH/M <sup>2</sup> ). DESVIO AZIMUTAL 0º NA HORIZONTAL. ....	81
TABELA 15 - RADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA MENSAL EM FLORIANÓPOLIS (KWH/M <sup>2</sup> ). DESVIO AZIMUTAL 0º COM INCLINAÇÃO DE 27º.....	82
TABELA 16 – ESTIMATIVAS DE PERDAS EM CADA ITEM DO SISTEMA. FONTE: PVSYST .....	85
TABELA 17- ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO PARA O DIMENSIONAMENTO. MÓDULO DA KYOCERA DE SILÍCIO POLICRISTALINO COM AS DIMENSÕES DE 150 X 67CM <sup>2</sup> . ....	86

---

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DE ATENDIMENTO TOTAL DE ÁGUA REGIÃO NORDESTE. FONTE SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. – DIAGNÓSTICO .....	6
FIGURA 2 - INTENSIDADE LUMINOSA SOBRE O ESPECTRO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES DE DIFERENTES PRESSÕES. FONTE: KOWALSKI, 2009 .....	15
FIGURA 3 - AÇÃO DA RADIAÇÃO SOBRE O DNA.....	16
FIGURA 4 - DOSE UV PARA REDUÇÃO DA CARGA INFECTANTE EM 4 LOGS DE DIVERSOS AGENTES PATOGÊNICOS. FONTE: HIJNEN ET AL., 2006, E USEPA, 2006B. ....	17
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO MUNDIAL DAS APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM 1985 E 2010. ....	22
FIGURA 6 - MÉDIA ANUAL DO TOTAL DIÁRIO DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL (KWH/M <sup>2</sup> /DIA) PARA O TERRITÓRIO BRASILEIRO. (FONTE: PEREIRA,2006).....	23
FIGURA 7 – COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR: DIRETA, DIFUSA E DEVIDA AO ALBEDO. FONTE: (TRAJANO 2010).....	25
FIGURA 8 - EXEMPLOS DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS DE C-SI DE VÁRIAS POTÊNCIAS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS (RUTHER,2004) .....	28
FIGURA 9 - TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	29
FIGURA 10 - DIAGRAMA ILUSTRATIVO DE UM SISTEMA CONECTADO À REDE.....	30
FIGURA 11 - DIAGRAMA ILUSTRATIVO DE UM SISTEMA ISOLADO. ....	32
FIGURA 12 - CURVA DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS (CARGA-DESCARGA) PARA BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO DO FABRICANTE NEWMAX. FONTE: SEGUEL (2009)35	35
FIGURA 13 - BLOCO A1 ENG. MECÂNICA, LOCAL DOS EXPERIMENTOS.....	39
FIGURA 14 - PERFIL E CORTE DO TUBO E VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS INTERFERENTES NA DOSE DE RADIAÇÃO. ....	43
FIGURA 15 – DOSE-RESPOSTA UV DOSE PARA DIFERENTES CATEGÓRIAS DE MICRORGANISMOS. (FONTE: COHN, 2002).....	47
FIGURA 16 – COMPORTAMENTO TÍPICO ANUAL DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM LOCALIDADES DO HEMISFÉRIO SUL. GRÁFICO GERADO PELO SOFTWARE RADIASOL.....	50

---

FIGURA 17 - ESQUEMA DO SISTEMA DO REATOR GERMICIDA PROPOSTO.	53
FIGURA 18 - BULBO SOBRE E IMERSO NA ÁGUA.(NOGUEIRA, 2003).....	54
FIGURA 19- ILUSTRAÇÃO DOS PERFIS DO REATOR. ....	55
FIGURA 20 - TEMPO DE DETENÇÃO PARA REATORES COM VERTEDOR (REPRESENTADOS PELA LETRA V) E SEM VERTEDOR EM FUNÇÃO DA VAZÃO (L/MIN.) E DA POTÊNCIA (W) DAS LÂMPADAS. ....	60
FIGURA 21 - DOSE TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PARA REATOR SEM VERTEDOR COM LÂMPADA DE 30W. ....	61
FIGURA 22 - DOSE TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PARA REATOR SEM VERTEDOR COM LÂMPADA DE 15W. ....	62
FIGURA 23 - DOSE TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PARA REATOR SEM VERTEDOR COM LÂMPADA DE 30W. ....	63
FIGURA 24 - VAZÕES LIMITES PARA CADA ALCANCE DE DOSE MÍNIMA DE 40MJ/CM <sup>2</sup> NO REATOR SEM VERTEDOR, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE POTÊNCIA DAS LÂMPADAS E DA QUALIDADE DA ÁGUA. ....	64
FIGURA 25 - DOSE TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PARA REATOR COM VERTEDOR COM LÂMPADA DE 30W. ....	65
FIGURA 26 - DOSE TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PARA REATOR COM VERTEDOR COM LÂMPADA DE 15W ....	66
FIGURA 27 - DOSE TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PARA REATOR COM VERTEDOR COM LÂMPADA DE 8W.....	67
FIGURA 28 - VAZÕES LIMITES PARA CADA ALCANCE DE DOSE MÍNIMA DE 40MJ/CM <sup>2</sup> NO REATOR COM VERTEDOR A PROFUNDIDADE DE 2CM, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE POTÊNCIA DAS LÂMPADAS E DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	68
FIGURA 29 - COMPARAÇÃO DE DOSE ATINGIDA ENTRE OS DOIS REATORES. .....	69
FIGURA 30- FOTOGRAFICAS DO REATOR . (1) ENTRADA COMUM PARA AS DUAS CONFIGURAÇÕES EXPOSTAS. (2) SAIDA COM VERTEDOR , (3) SAIDA SEM VERTEDOR E (4) INTERIOR DO TUBO. ....	72



---

FIGURA 31 - EFICIÊNCIA DO REATOR PARA VAZÃO DE 5 L/MIN EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E DA CONTAMINAÇÃO INICIAL DE E. COLI.....	78
FIGURA 32 - EFICIÊNCIA DO REATOR PARA VAZÃO DE 10 L/MIN EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E DA CONTAMINAÇÃO INICIALDE E. COLI.....	79
FIGURA 33 - COMPORTAMENTO TEÓRICO DA DOSE TRANSMITIDA A UMA ÁGUA COM 0,9 DE COEF DE ABS NA PROFUNDIDADE MÉDIA EM FUNÇÃO DA VAZÃO. ....	80
FIGURA 34 - COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA (KWH/M <sup>2</sup> ) DURANTE O ANO EM FLORIANÓPOLIS – SC.....	82
FIGURA 35 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO FOTOVOLTAICO. NO DESENHO (1)PAINEL FOTOVOLTAICO, (2) CONTROLADOR DE CARGA, (3)BATERIA, (4) SENSOR DE LUMINOSIDADE, (5) CAIXA DE CONTROLE ELÉTRICO. ....	84

---

## Sumário

LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVA.....	4
1.2. OBJETIVOS.....	7
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	7
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. SANEAMENTO E DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA.....	8
2.2. PROCESSOS DE DESINFECÇÃO DE ÁGUA.....	11
2.3. DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	14
2.4. TRANSMISSÃO DA DOSE ULTRAVIOLETA À ÁGUA.....	17
2.4.3. <i>Efeitos da qualidade da água e subprodutos</i> .....	18
2.4.4. <i>Medição de Energia UV</i> .....	19
2.5. ENERGIA SOLAR E SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	21
2.5.1. <i>Tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis</i> .....	26
2.5.2. <i>Sistemas de Geração Fotovoltaicos</i> .....	29
2.5.3. <i>Componentes de um Sistema Fotovoltaico Isolado</i> .....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38

---

3.1.	LOCAL DO EXPERIMENTO.....	38
3.2.	MODELO MATEMÁTICO DE DESINFECÇÃO.....	39
3.3.	DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE RADIAÇÃO TRANSMITIDA..	40
3.4.	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE DETENÇÃO.....	44
3.5.	VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DESINFECÇÃO ATRAVÉS DE EMSAIOS BACTERIOLÓGICOS.....	45
3.6.	DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	48
3.7.	MATERIAIS E APARELHOS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES.....	52
	3.7.1. <i>Lâmpada tubular</i> .....	53
	3.7.2. <i>Demais Materiais Utilizados</i> .....	54
	3.7.3. <i>Materiais e equipamentos para medições</i> .....	56
	3.7.4. <i>Análise bacteriológica</i> .....	56
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1	RESULTADOS TEÓRICOS.....	58
	4.1.1 <i>Resultados para reator de saída SEM vertedor</i> .....	60
	4.1.2 <i>Resultados para reator de saída COM vertedor</i> .....	64
4.2.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA CARACTERIZAR O DESEMPENHO DO REATOR.....	69
4.3.	SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	80
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	88
6.	REFERÊNCIAS.....	90
7.	APÊNDICES.....	95

## 1. INTRODUÇÃO

Anualmente, de acordo com a Organização Mundial de Saúde, cerca de 1,7 milhões de pessoas morrem de doenças relacionadas ao inadequado fornecimento de água e a problemas nas áreas de saneamento básico e higiene (PUNPENG, 2007), sendo que este número pode dobrar até 2025, quando dois terços da população mundial poderão sofrer com problemas ligados à escassez de água potável. (OMS, 2011)

A prevalência das doenças de veiculação hídrica, notadamente na América Latina, África e Ásia, constitui um forte indicativo da fragilidade dos sistemas públicos de saneamento. Tal fragilidade materializa-se na ausência de redes coletoras de esgotos e, principalmente, na qualidade da água distribuída à população, quando os sistemas de abastecimento se fazem presentes. (DANIEL et al, 2001). Na Figura 1 é possível observar a situação do nordeste brasileiro.

O tratamento convencional objetiva de um modo geral remover os sólidos presentes na água bruta, que é proveniente normalmente de rios ou lagos. O processo consiste na adição de coagulantes que aglutinam as partículas sólidas suspensas e dissolvidas da água para que possam por meio da gravidade decantar em um extenso tanque. Posteriormente a água decantada passa por um filtro que retém o restante das impurezas. Por fim, a água antes de estar disponível para beber, deve ser submetida ao processo de desinfecção, que implica na eliminação dos germes patogênicos eventualmente presentes, sendo parte fundamental no processo do independente do tratamento preliminar que tenha sido realizado (RICHTER, NETTO, 1991).

Grande parte da população, no entanto, não é atendida pelo sistema de distribuição de água, tendo assim como alternativa, nascentes, córregos, poços, água da chuva, etc. A água proveniente dessas fontes, mesmo apresentando características aparentemente dentro dos padrões aceitáveis, devem passar no mínimo por um processo de desinfecção para que possam ser consumidas. (BRASIL, 2006). Tecnicamente, aplica-se a simples desinfecção como meio de tratamento para águas que apresentem boas características físicas e químicas. É o caso das águas de vertentes ou nascentes, águas de fontes ou de poços protegidos, que se encontrem enquadradas na classe Especial da Resolução Conama Nº 20 de 18/06/1986 (Brasil, 2006). A

---

desinfecção consiste na inativação dos microrganismos patogênicos e é um importante elemento para promover uma segura ingestão de água e os métodos podem ser mecânicos (filtros por ex.), químicos (cloro e ozônio por ex.), térmico (aquecimento direto ou por microondas) e físico com a radiação ultravioleta (UV) (JULIUS, 2010).

As substâncias, como cloro gasoso, hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio, têm sido largamente utilizadas no processo de desinfecção em água para abastecimento público. Mais recentemente, devido à descoberta de que a reação do cloro com alguns compostos orgânicos leva à formação de TAM (trialometanos) principalmente o clorofórmio, o qual é carcinogênico (MEYER, 1994), a desinfecção UV tem ganho grande visibilidade. Shi & Hu (2010) reforçam também que novas tecnologias devem ser pesquisadas nesse assunto.

A desinfecção ultravioleta (UV) é uma tecnologia que vem sendo utilizada desde a década de cinquenta, com segurança, confiabilidade e competitividade. O sistema básico do reator germicida consiste em: invólucro acondicionador, lâmpada germicida e fonte de energia, sendo o conjunto de fácil confecção. O processo de desinfecção se baseia na radiação UV emitida pela lâmpada germicida de vapor de mercúrio. O sistema de desinfecção UV não remove partículas da água, porém inativa os microrganismo com potencial patogênico, agindo sobre o mecanismo reprodutor (DNA), impedindo sua reprodução. (CRAWFORD, 2005).

A radiação ultravioleta que naturalmente é emitida pelo sol e filtrada pela camada de ozônio pode ser gerada por lâmpadas especiais que aplicadas à água matam ou inativam microrganismos que podem causar doenças caso consumidos. Sommer (2008) destaca que nas últimas décadas foram realizadas muitas pesquisas sobre a resistência de vários microrganismos patogênicos a radiação UV no comprimento de onda de 253.7 nm. Este comprimento de onda, normalmente emitido por lâmpadas tubulares de baixa pressão de mercúrio, é especialmente danoso aos microrganismos, danificando seu DNA, matando-os ou inviabilizando sua reprodução. O melhor entendimento do processo, maior garantia e segurança das plantas de desinfecção UV leva a uma maior aceitação desta técnica. Três documentos técnicos já foram internacionalmente desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental

---

dos Estados Unidos (USEPA), a Associação Alemã de Gás e Água e o Instituto de Padrões da Áustria (SOMMER, 2008).

Buscando maior difusão da prática de desinfecção, que hoje basicamente é realizada de forma centralizada nas estações de tratamento de água através da adição de cloro, está sendo realizada a pesquisa para desenvolvimento e avaliação de um sistema alternativo descentralizado de desinfecção de água por meio de radiação ultravioleta. A abordagem da pesquisa vai além, englobando no sistema de desinfecção a alimentação elétrica das lâmpadas UV através de um painel solar fotovoltaico. Assim é possível atender comunidades isoladas que além da falta de acesso à água tratada, muitas vezes não possuem rede elétrica.

O protótipo pode ser usado também para demandas de áreas urbanas, como por exemplo, a desinfecção de água da chuva. Vale destacar, no entanto, que cerca de um terço da população mundial, aproximadamente dois bilhões de pessoas, não têm acesso à energia elétrica (CRAWFORD, 2005). A conversão solar fotovoltaica é uma forma de geração de energia elétrica renovável e promissora, que converte diretamente a luz do sol – uma fonte de energia inesgotável, silenciosa e, principalmente, não-poluente – em energia elétrica. A geração de eletricidade a partir do sol pode ser feita no local onde será consumida, evitando os altos custos de transmissão e distribuição da energia gerada. A distribuição geográfica de cidades e vilas sem eletricidade faz o uso da conversão solar fotovoltaica uma opção apropriada para sistemas de desinfecção UV, pois são confiáveis, têm vida útil superior a trinta anos e sua fonte de energia é abundante ao redor do globo (RUTHER, 2004).

Nesse estudo pretende-se analisar a eficiência de um protótipo de desinfecção de água para fins de consumo humano por meio de radiação UV com alimentação por painel solar fotovoltaico. O modelo é de fácil concepção, com materiais acessíveis, de baixo custo. Será testada a influência dos materiais do protótipo, a qualidade da água bruta que poderá ser desinfetada, além do estabelecimento dos limites de funcionamento. O estudo analisará a integração com alimentação elétrica fotovoltaica para averiguar a relevância desta alternativa. Temos assim, a possibilidade de maior autonomia e economia energética para localidades isoladas ou até mesmo urbanas.

---

## 1.1. Justificativa

Uma das causas líderes em mortalidade nos países em desenvolvimento é a diarreia, doença decorrente de infecções do trato gastrointestinal, cuja causa predominante são microrganismos patogênicos encontrados na água não tratada (NOGUEIRA 2003). É estimado que o acesso a água limpa possa prevenir milhões de mortes por ano, atribuídos a subnutrição entre outras doenças carreadas por patógenos de veiculação hídrica. A qualidade da água potável é um determinante ambiental poderoso da saúde. A garantia de uma água potável segura é fundamental para prevenir e controlar as doenças transmitidas pela água. (OMS, 2011).

A organização mundial da saúde (2008) recentemente estimou que quase 10% dos encargos globais referentes às doenças poderiam ser prevenidos aumentando o acesso a uma água segura para beber e melhorando o saneamento. Vários fatores contribuem para este valor, tais como: Economias em gastos em saúde para indivíduos e agências de saúde, ganho de dias produtivos na faixa etária de 15 a 59 anos e dias de escola para as crianças e economia de tempo resultante de um acesso mais conveniente a água potável, também acrescenta-se os valores de mortes evitadas, com base em futuros ganhos.

Embora a análise da OMS se baseia principalmente em pesquisa em países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, a temporária interrupção do abastecimento de água potável representa uma sério ameaça em qualquer lugar. Por exemplo, no Furacão Katrina em Nova Orleans, EUA e no tsunami na Ásia em 2004 milhares de pessoas foram infectadas por doenças causadas por agentes patogênicos quando o seu acesso a água foi interrompido (OMS, 2011).

As novas tendências internacionais de regulamentação dos padrões de potabilidade das águas de consumo humano indicam uma preocupação crescente com a presença de novos contaminantes orgânicos e inorgânicos, bem como com a introdução de vários subprodutos do próprio processo de tratamento. Nesse particular, objetiva-se controlar, em especial, os subprodutos introduzidos pelos processos de desinfecção, seja pelo emprego do cloro, seja pela utilização dos denominados desinfetantes alternativos. (DANIEL et al 2001). A formação de subprodutos em consequência do uso do cloro,

---

por exemplo, pode tornar o radiação ultravioleta uma opção mais visada para uma prática desinfecção em demandas urbanas (com usos não nobres) ou rurais. Cinco de seis pessoas sem acesso a uma fonte de água potável vivem em áreas rurais. Nesses locais normalmente não se tem acesso a nenhuma tipo de serviço social básico e energia elétrica. As estruturas políticas nacionais e internacionais de hoje reconhecem que mais atenção a este tópico é necessário para atender a meta da água dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (OMS, 2011). Vale destacar que nosso país possui 20 milhões de brasileiros que atualmente não têm acesso à energia elétrica. Isso se deve, principalmente, ao fato de que estas populações encontram-se localizadas em áreas remotas, onde se torna extremamente caro à concessionária levar energia (IBGE, 2007). Segundo Salamoni (2009) áreas rurais ou remotas, onde os custos envolvidos para a expansão da rede são elevados, são considerados casos atrativos para a utilização da energia fotovoltaica (FV).

Na ausência de tratamento público de água, moradores de regiões remotas utilizam água dos rios próximos e na melhor das hipóteses de nascentes ou da chuva. A Figura 1 ilustra a defazagem da região Nordeste, onde grande parte dos municípios apresentam um baixo índice de atendimento público de água potável. Soluções como a proposta podem suprir essa demanda atendendo uma ou mais famílias nessas localidades. A utilização da radiação UV é uma alternativa já estudada, pode ser aprimorada e tornar-se acessível a essas pessoas. Acrescenta-se o fato de a energia FV apresentar baixo impacto ambiental, sem ruído ou poluição durante a sua utilização. A tecnologia é também considerada uma das mais viáveis para a utilização no ambiente urbano, devido à sua capacidade de integração às edificações, bem como para atender regiões sem rede elétrica (SALAMONI, 2009).



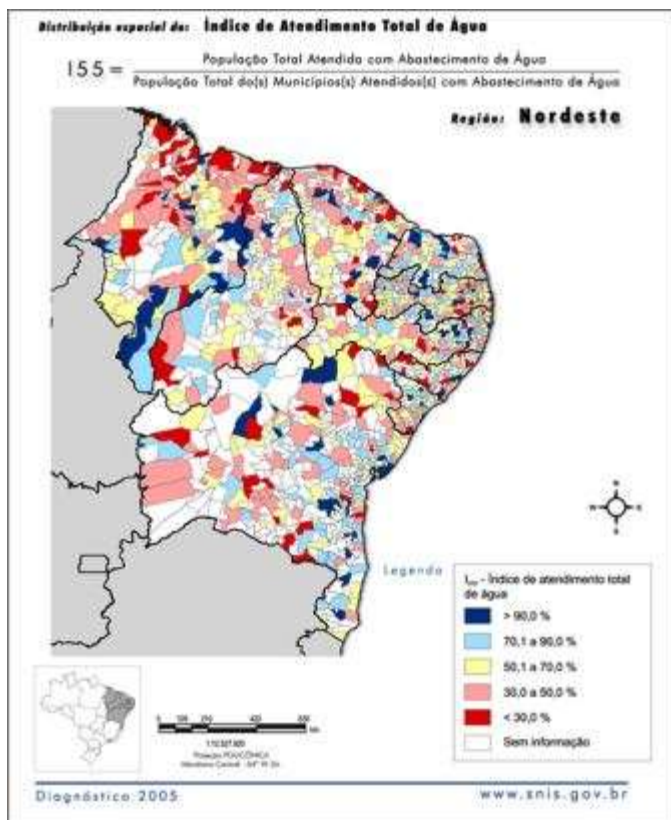


Figura 1 - Distribuição espacial do índice de atendimento total de água região Nordeste. Fonte SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. – Diagnóstico

---

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Estudar o funcionamento de um reator ultravioleta de fácil concepção alimentado por painel fotovoltaico para desinfecção da água.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Gerar um modelo matemático do processo de desinfecção por ultravioleta considerando as características do protótipo proposto e os parâmetros interferentes no processo.
2. Avaliar vazões limites de funcionamento e taxas de desinfecção para diferentes hipóteses de qualidade da água interferentes no processo e potência das lâmpadas.
3. Dimensionar o sistema fotovoltaico para o reator de desinfecção UV.

---

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Saneamento e doenças de veiculação hídrica.**

Devido à complexidade dos fatores que determinam a qualidade das águas (hidrodinâmicos, físicos, químicos e biológicos), amplas variações são encontradas entre rios ou lagos localizados em diferentes regiões. Da mesma forma, a extensão e a severidade dos danos causados por impactos antropogênicos também variam amplamente entre os diferentes tipos de mananciais e suas características hidrodinâmicas, como exemplos citam-se o tempo de detenção, vazão, morfologia e padrão de mistura da coluna de água. Deve-se destacar também que os diversos usos da água, tais como consumo e higiene humanos, pesca, agricultura (irrigação e suprimento para animais), transporte fluvial, produção industrial, resfriamento industrial, diluição de resíduos, geração de energia elétrica e atividades recreacionais, são afetados de modos diferentes pela alteração da qualidade da água, como por exemplo, a presença de matéria orgânica, que pode ser benéfica à irrigação, mas, por outro lado, acarreta sérios problemas à potabilização da água para consumo humano (PÁDUA, 2005).

Segundo Bastos (2003) potável é a água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde. Ou seja, a água potável é aquela que reúne características que a coloca na condição própria para o consumo do ser humano, portanto, deve estar livre de qualquer tipo de contaminação. (BASTOS et al, 2003).

O aumento das atividades industriais e agrícolas e o crescimento populacional intensificam a demanda por água ao mesmo tempo em que contribuem para a deterioração da sua qualidade. As maiores demandas vêm de atividades que usualmente são menos exigentes em relação à qualidade da água, tal como a agricultura, produção de energia e resfriamento industrial, em comparação aos suprimentos para consumo humano e determinadas manufaturas industriais. Assim, a água é vital para a proteção

---

da saúde humana e também para o desenvolvimento econômico. O conflito potencial entre os diversos usos da água, no que se refere à qualidade e quantidade, tem gerado tensões e problemas legais (PÁDUA, 2005).

A disponibilidade da água de qualidade e em quantidade adequada, evita ou reduz a propagação de muitas doenças. A contaminação dos corpos d'água por excretas de animais e humanos introduz o risco de infecção para aqueles que usam essas águas para beber, preparar alimentos, higiene pessoal e mesmo recreação. As doenças de veiculação hídrica constituem o grupo no qual o agente patogênico é ingerido junto com a água. A perspectiva de infecção de uma doença de veiculação hídrica apresenta distintas características quando comparada à contaminação por agentes químicos, dificultando o estabelecimento de concentrações mínimas de patogênicos. A infecção varia intrinsecamente com a virulência, a dose infectante e a resistência imunológica do indivíduo. (DANIEL et al, 2001)

Dentre as muitas doenças veiculadas pela água são mais frequentes: poliomielite, hepatite A, febre tifóide, cólera, salmonelose, shigelose, amebíase e esquistossomose (CRAUN, 1996). Novas abordagens sobre o potencial patogênico das águas de consumo vêm se *“dirigindo a outras bactérias, como Campylobacter e Aeromonas, e a protozoários, como Giárdia e Cryptosporidium, além de diversos tipos de vírus entéricos. Doenças do aparelho respiratório também têm sido associadas à água, como a pneumonia transmitida pela bactéria Legionella pneumophila”*(DANIEL, 2001). Na Tabela 1 são apresentadas as principais doenças de veiculação hídrica e os respectivos agentes etiológicos, sintomas usuais e fontes de contaminação.

Tabela 1 - Principais doenças de veiculação hídrica.

Doença	Agente etiológico	Sintomas	Fontes de contaminação
Febres tifóide e paratifóide	<i>Salmonella typhi</i> <i>Salmonella paratyphi</i> A e B	Febre elevada, diarreia	Fezes humanas
Disenteria bacilar	<i>Shigella dysenteriae</i>	Diarreia	Fezes humanas
Disenteria amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>	Diarreia, abscessos no fígado e intestino delgado	Fezes humanas
Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>	Diarreia e desidratação	Fezes humanas e águas costeiras
Giardíase	<i>Giardia lamblia</i>	Diarreia, náusea, indigestão, flatulência	Fezes humanas e de animais
Hepatite A e B	Vírus da hepatite A e B	Febre, icterícia	Fezes humanas
Poliomielite*	Vírus da poliomielite	Paralisia	Fezes humanas
Criptosporidiose	<i>Cryptosporidium parvum</i> , <i>Cryptosporidium muris</i>	Diarreia, anorexia, dor intestinal, náusea, indigestão, flatulência	Fezes humanas e de animais
Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i> , <i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i> , <i>Aeromonas hydrophila</i> , Rotavírus e outros vírus entéricos	Diarreia	Fezes humanas

Fonte: DANIEL (2001) adaptado de von sperling (1995) Cohn et al (1999).

As bactérias patogênicas, os vírus e os parasitos, constituem uma das principais fontes de morbidade e mortalidade em nosso meio. São responsáveis por numerosos casos de enterites, diarreias infantis e doenças epidêmicas (como cólera e a febre tifóide), que podem resultar em casos letais. (BRASIL, 2006).

Avanços nas técnicas analíticas são um componente fundamental da pesquisa de patógenos emergentes. Pelo incremento de nossa capacidade para concentrar e detectar microrganismos em amostras de água pode-se reconhecer novos patógenos ou associar microrganismos conhecidos com doenças de etiologia desconhecida. Entretanto, apesar dos avanços na tecnologia de diagnóstico de doenças relacionadas com a água, permanece de etiologia desconhecida uma significativa

---

percentagem do total de surtos de doenças. Estatísticas publicadas nos EUA mostram que entre 1991 e 2000, os agentes etiológicos de cerca de 40% dos surtos associados ao consumo da água não foram identificados. O reconhecimento de patógenos emergentes e re-emergentes não depende exclusivamente do desenvolvimento de novos métodos analíticos. A reavaliação de métodos no contexto de fornecer conhecimento sobre os riscos à saúde, a partir de doenças relacionadas com a água, conduz a uma evolução na interpretação dos resultados, tal como para a contagem de bactérias heterotróficas e seu significado sanitário (OMS, 2008).

## **2.2. Processos de Desinfecção de água**

A desinfecção de águas de abastecimento é definida como o processo integrante do tratamento cujo objetivo é a inativação de microrganismos patogênicos presentes na água, possibilitando, assim, a minimização da probabilidade de ocorrência de doenças de veiculação hídrica através do consumo e manuseio da água tratada. Os processos de desinfecção têm como objetivo a destruição ou inativação de organismos patogênicos, capazes de produzir doenças, ou de outros organismos indesejáveis (Witt e Reiff, 1996).

A ação dos desinfetantes sobre os microrganismos pode se dar sob três mecanismos (Stanier et al., 1963) citado por (DANIEL, 2001): (a) destruição ou danificação da organização estrutural da célula, (b) atuação sobre os constituintes da parede celular, que são destruídos ou danificados, gerando disfunções na ação da membrana semipermeável ou ainda (c) o desinfetante age combinando-se com ácidos ribonucléicos, no interior do núcleo ou do citoplasma.

A eficiência da desinfecção depende de diversos fatores tais como tempo de contato com a água, dosagem, tipo de agente químico, intensidade e natureza do agente físico e tipos de organismos. Quanto maior o patogênico (protozoários, ovos de helmintos, etc) menor a eficiência do desinfetante. Patógenos em formas esporuladas e encistadas são especialmente resistentes. A dosagem, o tempo de contato e o tipo de agente utilizado na desinfecção devem ser estabelecidos preferencialmente por meio de ensaios considerando-se o

---

potencial de formação de subprodutos indesejados durante o processo e os riscos sanitários que dele podem advir. (PÁDUA, 2005)

O cloro em sua forma gasosa, como hipoclorito de cálcio ou como hipoclorito de sódio é o produto mais utilizado na desinfecção de água nas ETAs. Na forma de hipoclorito de cálcio ou de sódio, o emprego de cloro normalmente se restringe a ETAs menores. Devido ao baixo custo e eficiência, o cloro passou a ser empregado mundialmente na desinfecção de águas desde o início do século XX. (RICHTER 1991)

Entretanto, em 1974, quando foi observada a formação de trihalometanos (THM) em águas de abastecimento cloradas, passou-se a dar maior atenção a desinfetantes alternativos a ele. Nos últimos anos, diversas pesquisas têm mostrado que a reação do cloro com algumas substâncias, principalmente substâncias húmicas, leva à formação de THM, compostos organoclorados que podem causar problemas à saúde humana. Além de THM, podem ser formados outros subprodutos da cloração, tais como haloacetônitrilas, haloacetonas, ácidos haloacéticos, clorofenóis, dentre outros, potencialmente prejudiciais à saúde pública. Tem sido verificado que os TAM são potencialmente cancerígenos e as haloacetônitrilas podem ter ação mutagênica e induzir o desenvolvimento de tumores (MEYER, 1994).

Contudo, o risco sanitário, eventualmente associado a subprodutos da cloração, é menor do que aquele decorrente das doenças de veiculação hídrica a que a população estará sujeita caso a água não seja submetida a algum processo de desinfecção. Mesmo assim, caso os subprodutos da cloração apresentem-se em concentração superior à máxima permitida, deve-se optar por outros métodos de desinfecção. (PADUA, 2005)

Algumas características físicas da água como a turbidez, tem papel fundamental na eficiência da desinfecção, pode promover a proteção dos microrganismos servindo como escudo e barrando a ação do desinfetante. O próprio padrão de potabilidade vigente estabelecido pela Portaria 518/2004 (Ministério da Saúde, 2004) testifica esta assertiva. A mesma recomenda, para efluentes de estações convencionais, turbidez máxima permissível de 1,0 uT, elevando-se para 2,0 uT no emprego da filtração lenta para 95% das amostras. Enquanto as partículas coloidais apresentam dimensões variando de 0,002 a 0,004 mm (2 a 4  $\mu$ m), para as bactérias do gênero *Salmonella* e

---

coliformes totais, as variações são de 0,5 a 2,0  $\mu\text{m}$  e, para os vírus, de 0,025 a 0,1  $\mu\text{m}$ . Outros interferentes na desinfecção são: presença de matéria orgânica, associada à cor verdadeira, presença de compostos inorgânicos que reagem com o desinfetante, temperatura da água e PH, causando a dissociação química do desinfetante. (MEYER, 1994)

Os microrganismos presentes nas águas naturais são, em sua maioria, inofensivos à saúde humana. Porém, devido à contaminação por esgoto sanitário, é necessário um maior controle.

A prática de controle microbiológico de qualidade da água de consumo no Brasil se fundamenta no controle da presença de bactérias do grupo coliformes, seguindo tendência internacional em vigor até o final da década de 80. Tal controle se baseia na lógica de organismos indicadores, a partir do pressuposto de que, dadas as características dos coliformes, sua ausência nas águas de abastecimento, sobretudo dos coliformes fecais, significaria uma garantia sanitária de segurança microbiológica da água em termos de saúde pública. O extensivo emprego dos coliformes fecais como indicadores microbiológicos de qualidade da água é fundamentado pela inexistência do monitoramento individual dos diversos parasitos presentes nas águas naturais. (DANIEL, 2001 et al)

A determinação de coliformes totais e fecais, quali ou quantitativa, pode ser feita pelo método dos tubos múltiplos, contagem em membrana filtrante e em substrato cromogênico. Este último apresenta como principal vantagem o tempo de resposta de 24 horas, uma vez que o mesmo realiza a determinação simultânea de *E. coli* e coliformes totais, prescindindo de ensaios confirmatórios (BASTOS, 1999).

Todavia, a despeito dos avanços, tem sido constatada a fragilidade deste controle. Embora de grande praticidade, o teste de coliformes não garante a ausência de outros patogênicos nas águas, mais resistentes que as bactérias. O Standard Methods for the



Examination of Water and Wastewater não apresenta mais um método padronizado para a identificação de protozoários em águas. No momento estão sendo avaliados vários métodos para uma posterior padronização. O monitoramento dos protozoários é problemático, devido a suas dimensões, à baixa concentração na massa líquida, à inabilidade em aumentar o número de indivíduos em culturas in vitro e à dificuldade de identificação quando misturados a outras partículas.

### 2.3. Desinfecção por Radiação Ultravioleta

A luz ultravioleta faz parte do espectro eletromagnético com comprimentos de onda entre 100 e 400 nanômetros (nm). Abrange as faixas: UV-A, UVB e UV-C. A Radiação Ultravioleta Germicida é normalmente gerada por lâmpadas de onda de pico de 253.7 nm (UV-C) com ação germicida. O alvo principal da desinfecção UV é o DNA, ácido desoxirribonucleico. Os micróbios são destruídos pela radiação ultravioleta quando a luz penetra através da célula e é absorvida pelo ácido nucleico. A absorção da luz ultravioleta pelo ácido nucleico provoca alterações da informação genética que incapacita a reprodução da célula. (COHN, 2002.)

Como confirma Daniel et al (2001) “*Ao contrário de outros desinfetantes, que têm ação química, a radiação ultravioleta atua por meio físico, atingindo principalmente os ácidos nucleicos dos microrganismos, promovendo reações fotoquímicas que inativam os vírus e as bactérias.*” A radiação absorvida pelos nucleotídeos – blocos de construção do DNA e RNA – promove a formação de união entre nucleotídeos adjacentes, criando moléculas duplas ou dímeros de timina e citosina. Essas moléculas impedem a duplicação normal do DNA, interrompendo o processo de reprodução celular (DANIEL & CAMPOS, 1993). Há a ocorrência do processo inverso, no entanto, sob certas condições.

A absorção máxima de radiação ultravioleta pelo indicador E. coli ocorre em 260 nm, e o comprimento de onda de 254 nm é relativo à emissão máxima de lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, como é possível verificar na Figura 2. O intervalo de comprimento de onda compreendido entre 245 e 285 nm é considerado a faixa germicida

ótima para a inativação de microrganismos. A grande maioria das lâmpadas utilizadas é de vapor de mercúrio ionizado, de baixa e média pressão (por exemplo, tubular, tipo lâmpadas fluorescentes) e com diversos valores de potência. Isso significa que o método de desinfecção com radiação ultravioleta utiliza a energia elétrica a fim de gerar radiação para eliminação, a inativação ou a inviabilização de microrganismos (BOLTON, 1999).

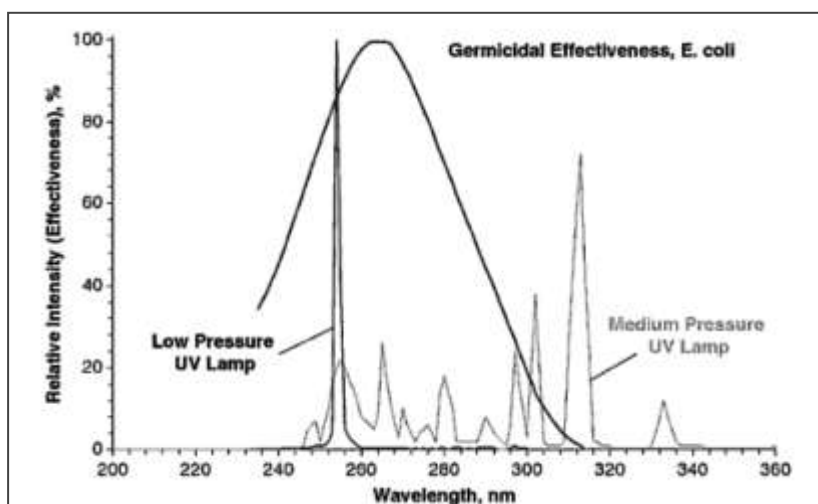


Figura 2 - Intensidade luminosa sobre o espectro para lâmpadas fluorescentes de diferentes pressões. Fonte: KOWALSKI, 2009

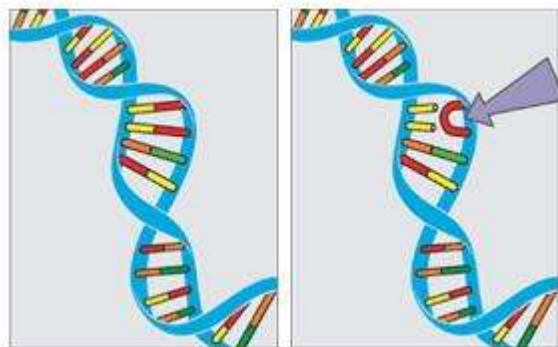


Figura 3 - Ação da Radiação sobre o DNA

Fonte: UVFIFE (Brasil), 2011

A fonte emissora de luz UV mais comumente encontrada no mercado é a lâmpada ultravioleta tubular. Mais recentemente, pode-se encontrar também no mercado os diodos emissores de luz, mais conhecidos como LEDs (*Light Emitting Diodes*). As lâmpadas tubulares apresentam maior disponibilidade no mercado nacional, no entanto, as lâmpadas LED apresentam grande durabilidade e pequeno consumo de energia, o que influencia fortemente no dimensionamento da fonte de energia e conseqüentemente no custo final do sistema de desinfecção.

A medida prática padrão utilizada no acompanhamento do processo é a chamada dose de radiação. A dose é obtida integrando-se o tempo de exposição de uma área definida pela intensidade útil de potência germicida que chega a porção da água. A Agência Estadunidense de Proteção ao Meio Ambiente, EPA, considera  $50\text{mW}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$  ou  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  a dose mínima aceitável para tratamento UV. Em setembro de 2000 a Fundação Nacional Sanitária, também norte americana, estabeleceu como dose mínima  $38\text{mW}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$ . (COHN, 2002.) Na Figura 4 é apresentada as respectivas doses necessárias para se obter 4- logs de inativação, ou seja, 99,99%, para diferentes microrganismos. Percebe-se que com a dose de  $40\text{mJ}/\text{cm}^2$  é possível um significativo resultado para uma grande gama de vírus e bactérias.

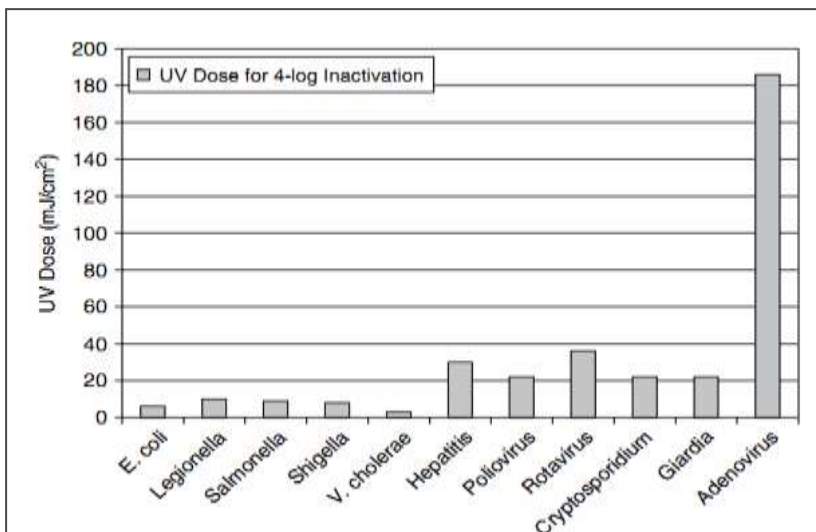


Figura 4 - Dose UV para redução da carga infectante em 4 logs de diversos agentes patogênicos. Fonte: Hijnen et al., 2006, e USEPA, 2006b.

## 2.4. Transmissão da dose ultravioleta à água

A dose ultravioleta transmitida ( $\text{mWs/cm}^2$ ) é função de duas principais variáveis: do tempo de exposição (s) reflexo da vazão e características hidráulicas do reator e da intensidade de radiação UV ( $\text{mW/cm}^2$ ) transmitida que depende da geometria do reator e das perdas a partir da emissão da lâmpada.

A atenuação da radiação a partir do momento que atinge a lâmina d' água é outra importante abordagem que deve ser considerada. O coeficiente de absorção dita a quantidade da radiação que é perdida quando ela penetra em um meio. O coeficiente de absorção é mensurado em  $\text{cm}^{-1}$  valor para a água destilada pura é próximo à zero. Matéria orgânica natural, ferro, nitrato e manganês absorvem luz UVC e elevam o coeficiente de absorção da amostra (KOLCH, 1999). O coeficiente de absorção em água potável esperado fica na faixa de 0,01 e 0,2  $\text{cm}^{-1}$ . Este

---

coeficiente é expresso na base e, se for apresentado na base 10 é chamado de absorvância a qual representa o inverso da transmitância.

#### **2.4.3. Efeitos da qualidade da água e subprodutos**

A transmissão da luz UV pode ser afetada por vários constituintes de qualidade da água, tanto dissolvidos e suspensos. Estes componentes podem absorver e / ou dispersar a luz UV protegendo microrganismos da exposição letal UV. A qualidade da água também pode influenciar a taxa de incrustação sobre o envelope de quartzo em torno da lâmpada. (LINDEN, 2011)

Absorvedores de UV são componentes que absorvem a luz UV germicida e diminuem a irradiância UV dentro de um sistema de desinfecção. Tipicamente, os compostos contendo grupos aromáticos são fortes absorvedores de UV, incluindo matéria orgânica natural (substâncias húmicas e fúlvicos) e alguns produtos químicos orgânicos (por exemplo, aqueles com estruturas fenólicas). Outros importantes absorvedores são alguns metais (por exemplo, ferro férrico) e nitrato. A absorvância UV normalmente é monitorada no comprimento de onda de 254 nm, embora uma varredura da faixa de comprimento de onda germicida completa 200-300 nm é mais revelador para aplicações que envolvem lâmpadas UV policromadas. (LINDEN, 2011)

Processos de tratamento de água a montante pode ter um efeito na absorvância UV através de adição de produtos químicos como o cloro, o ferro férrico, e permanganato. Porque o ferro tem uma absorvância molar UV muito alta, mesmo em concentrações muito baixos (<0,01 mg / L) pode resultar em grandes impactos nos sistemas UV. Ozônio residual também absorve significativamente a luz UV. Um tratamento adequado a montante é importante para melhorar a transmissão UV e, assim, reduzir o tamanho do sistema de UV necessário. (LINDEN, 2011)

Além de constituintes dissolvidos, partículas também podem interferir na desinfecção UV. Colóides orgânicos e metálicos e sólidos que formam a turbidez podem absorver e / ou dispersar a luz UV. Normalmente, abaixo de uma turbidez de 10 uT, a presença de partículas não afeta significativamente o funcionamento dos sistemas de desinfecção UV em termos de prestação de luz UV a água em um reator

. Níveis elevados de turbidez presente na água exigiriam níveis mais elevados de energia UV para atingir a desinfecção, semelhante à situação com a maior absorbância UV. Se partículas protegerem um patógeno da luz UV através da associação partículas-micróbio, a desinfecção UV pode ser comprometida. Análise granulométrica pode ser usada para monitorar a presença de partículas de proteção, o que indicaria questões sobre o desempenho de processos a montante (por exemplo, filtração). (LINDEN, 2011)

#### **2.4.4. Medição de Energia UV.**

A medição precisa da dose de UV, tanto na escala de bancada ou em sistemas em escala de campo é essencial para o desenvolvimento de dados reprodutíveis quanto à dose UV-resposta de microrganismos e a degradação dos contaminantes. Como a luz UV não pode ser vista ou capturada para medição fora do local, métodos especiais foram desenvolvidos para esse fim. Muitas técnicas têm sido desenvolvidas para medir a irradiância UV ou fluência UV, incluindo métodos físicos, químicos e biológicos. (LINDEN, 2011)

#### **Técnicas físicas**

Métodos físicos são as técnicas que envolvem radiômetros equipados com detectores calibrados para restringir ou expandir as respostas espectrais. Detectores Radiômetros podem medir com precisão apenas a irradiância incidente e próxima do normal ao plano do detector e, portanto, estes sistemas são aplicados principalmente para experimentos de exposição aos raios UV em escala laboratorial, onde a luz UV pode ser colimada de forma eficaz. Radiômetros medem a intensidade incidente na superfície do detector, por isso, as correções para a absorção e a profundidade das amostras de líquidos devem ser feitas para fornecer uma medida da irradiância média em uma porção da amostra. A Radiometria tem sido empregada rotineiramente em reatores de grande escala, onde sensores UV monitoram a constância da saída UV e indicam quando a irradiância diminuiu devido à incrustação da lâmpada, alterações da qualidade da água, ou envelhecimento das lâmpadas. (LINDEN, 2011)

---

## **Técnicas de químicas**

Actinometria Química é a medição da quantidade de exposição à luz UV obtida pela mudança produzida e detectada em um produto químico. Alguns actinômetros comuns em uso para medição de irradiância UV incluem ferrioxalate de potássio, iodeto de potássio / iodato e uridina. Cada um tem suas vantagens e desafios para o uso com fontes UV monocromáticas e policromáticas. Actinômetros ideais para medir luz UV germicida policromática teriam as seguintes características (1) Eles iriam absorver apenas a luz UV germicida, (2) teriam um espectro de absorção semelhante ao do DNA, (3) teriam rendimento quântico constante ao longo da faixa de comprimento de onda germicida, (4) seriam fáceis de quantificar usando equipamentos de laboratório padrão, e (5) seriam atóxico no ambiente. (LINDEN, 2011)

## **Técnicas biológicas**

A medição biológica da dose tem-se centrado no bioensaio ou técnica de biodosimetria para avaliar a dose de UV em um sistema de desinfecção UV de fluxo contínuo. Na abordagem de bioensaio, uma curva dose-resposta UV é estabelecida por um dado organismo sob condições controladas, onde a dose de UV pode ser determinada com precisão. A cultura do mesmo organismo, em seguida, é liberada para um sistema mais complexo e a inativação por log é determinada. Este valor de inativação log, então, é utilizado juntamente com a curva dose-resposta UV inicial para estimar qual a dose de UV deve ter sido transmitida para atingir a resposta de inativação resultante. Como é um teste de base biológica, o método fornece uma medida efetiva da dose UV necessária para o efeito desejado germicida. Este método fornece um valor de dose única média UV [chamada de redução de dose equivalente (RDE)] para o sistema de desinfecção UV. São considerados quatro critérios para a seleção de um organismo para o bioensaio, (1) inativação constante sobre uma ampla gama dose UV, (2) Método de cultura simples e suficiente, (3) não patogênicas, e (4) estabilidade temporal em relação à susceptibilidade UV. Além disso,

---

técnicas utilizadas na cultura dos organismos podem desempenhar um papel na susceptibilidade UV subseqüentes. (LINDEN, 2011)

## **2.5. Energia solar e sistemas fotovoltaicos**

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Alexandre-Edmond Becquerel que, em 1839, quando relatou suas observações da ação dos raios solares sobre soluções químicas, produzindo corrente elétrica. (BECQUEREL, 1839). A descoberta científica de Becquerel só começou a ser utilizada comercialmente após o desenvolvimento da célula fotovoltaica de silício, em 1954, nos Laboratórios Bell por Calvin Fuller, Daryl Chapin e Gerald Pearson. A evolução das células fotovoltaicas se deu principalmente devido à aplicação na área espacial, como fonte de energia para os satélites artificiais, que também levou ao desenvolvimento de células com materiais diferentes do silício (NELSON, 2003).

Nos países desenvolvidos a geração solar fotovoltaica é a tecnologia que apresenta a maior taxa de crescimento entre todas as tecnologias de geração de eletricidade. De 2000 a 2010 cresceu a uma taxa média de 53% ao ano, e de 2009 para 2010 o crescimento foi de 119%. Somente no ano de 2010 foram produzidos em todo o mundo mais de 27 mil MWp. Mais de 90% dos cerca de 50 mil MWp instalados até o presente entraram em operação nos últimos cinco anos. A Figura 5 ilustra a evolução deste mercado nas últimas 2 décadas, bem como a distribuição desta produção entre as quatro principais aplicações.

Uma das grandes tendências é termos os sistemas fotovoltaicos integrados as edificações, aproveitando área já construída e a proximidade das unidades consumidoras. No Brasil, o uso desta tecnologia de forma integrada à edificação urbana e conectada à rede elétrica ainda é bastante reduzido, havendo até o momento somente algumas aplicações desta modalidade, na sua maioria em campus universitários (ZILLES e OLIVEIRA, 2001; RÜTHER, 2004). A energia solar FV revela-se uma fonte promissora, tanto para as áreas distantes e ainda não eletrificadas, como também para os grandes centros urbanos, onde demandas de ar condicionado elevam as curvas de carga, apresentando uma excelente sincronicidade com a geração solar.



Quando colocados estrategicamente no sistema de distribuição, podem contribuir significativamente para a redução da curva de carga (JARDIM, et al., 2007).

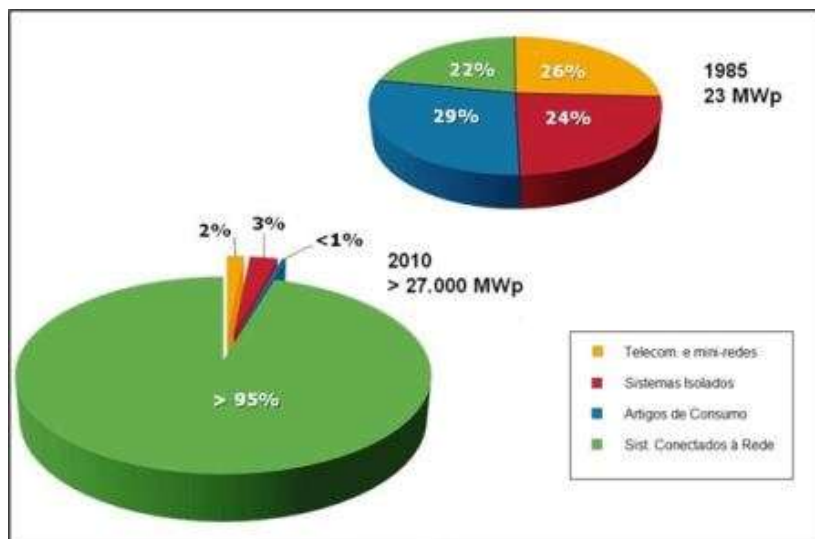


Figura 5 - Distribuição mundial das aplicações da tecnologia solar fotovoltaica em 1985 e 2010.

A estrutura energética do Brasil é privilegiada quando comparada à de outros países, pode-se citar, além do potencial hidroelétrico, a possibilidade do uso da biomassa, ventos e exploração da grande incidência solar presente no território brasileiro. Assim como ocorre com os ventos, o Brasil é superior em termos de radiação solar. Além disso, o Nordeste possui irradiação comparável às melhores regiões do mundo nessa variável, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no Deserto de Mojave, Califórnia. (SALAMONI, 2009). Dada sua localização geográfica, o país é particularmente privilegiado por ter níveis de irradiação solar superiores à maioria das nações desenvolvidas (PEREIRA et al., 2006).

Os níveis de irradiação solar incidentes no Brasil foram mapeados pelo SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*),

financiado pelo PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e co-financiado pelo GEF (Fundo Global para o Meio Ambiente). Os dados do SWERA permitiram a confecção do “Atlas Brasileiro de Energia Solar”, publicado em 2006. Os valores de irradiação foram obtidos para uma década completa de dados, de julho de 1995 a dezembro de 2005. A Figura 6 resume o trabalho desenvolvido nesse projeto, onde é apresentada a irradiação solar global horizontal ( $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ ) para o território brasileiro.

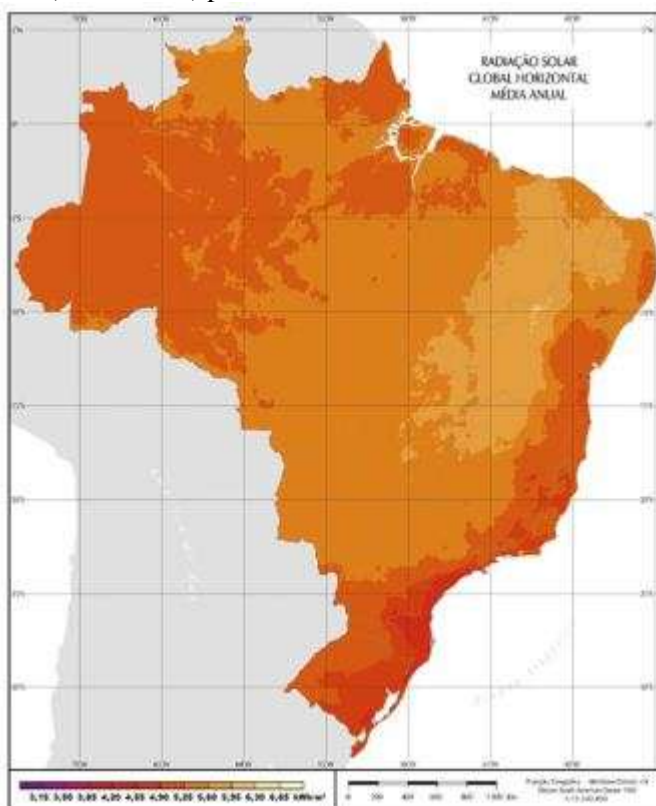


Figura 6 - Média anual do total diário da irradiação solar global horizontal ( $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ ) para o território brasileiro. (Fonte: PEREIRA, 2006).

---

Em qualquer instalação solar fotovoltaica o módulo solar fotovoltaico é a célula básica do sistema gerador. As finas linhas de silício da célula do painel têm seus elétrons excitados pela radiação solar, surgindo um potencial elétrico que é transformado em corrente. O número de módulos conectados em série irá determinar a tensão de operação do sistema em corrente contínua. Já a corrente do gerador solar é definida pela conexão em paralelo de painéis individuais ou de *strings* (conjunto de módulos conectados em série). A potência instalada, normalmente especificada em corrente contínua, é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais. (RUTHER, 2004).

A potência nominal de uma célula ou módulo fotovoltaico é a chamada potência de pico (ou potência máxima) obtida sob condições padrão de teste (CPT). Daí vem o fato de se incluir o sufixo “pico” (ou “p”) à unidade de potência utilizada. As unidades comumente usadas são: watt-pico (Wp) e quilowatt-pico (kWp). As CPT para células e módulos fotovoltaicos são: (a) temperatura da junção da célula fotovoltaica =  $(25 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ; (b) intensidade de radiação (irradiância) =  $1000 \text{ W/m}^2$  normal à superfície de ensaio, e (c) espectro solar = AM1,5 (Projeto de Revisão 3:082.01-012/2000 da NBR10899/1988). Multiplicando a irradiância de referência pela eficiência de conversão do módulo e sua área encontra-se a potência pico ou nominal.

O Atlas Solar do Brasileiro apresenta mapas de irradiação solar global (horizontal), difusa e inclinada (no plano inclinado com ângulo igual à latitude do local) que mostram faixas de valores da média anual e média sazonal da irradiação (em  $\text{kWh/m}^2$ ) na resolução espacial de  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ . A irradiação solar (H) é obtida integrando a irradiância solar (em  $\text{W/m}^2$ ) durante o período de um dia. A irradiação típica média de uma localidade,  $4,5 \text{ kWh/m}^2$ , por exemplo, indica indiretamente quantas horas equivalentes com irradiância de  $1 \text{ kW/m}^2$  ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) tivemos no dia, ou seja quantas horas um suposto módulo converteu em energia sua potência pico. Assim é facilitada a estimativa (desconsiderando perdas) da geração diária de um módulo ou conjunto fotovoltaico.

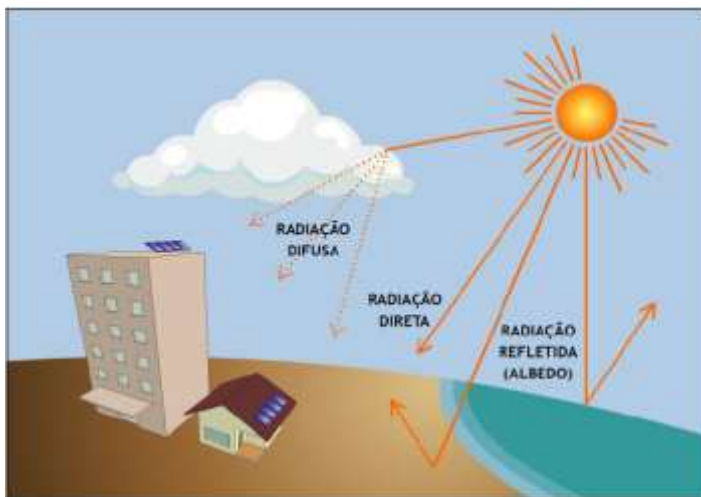


Figura 7 – Componentes da radiação solar: direta, difusa e devida ao albedo. Fonte: (Trajano 2010)

Os módulos solares eram fabricados com tensões de circuito aberto normalmente em torno de 20 V, apropriadas para a carga de baterias de 12 V em sistemas isolados (aplicação tradicionalmente mais comum). Com as crescentes instalações conectadas à rede elétrica - onde as tensões de 110 ou 220 V são utilizadas - a indústria vem lançando módulos com tensões de circuito aberto mais elevadas (*e.x.* 95V). (RUTHER, 2004)

Em qualquer caso, para atingir a potência instalada de projeto, normalmente são utilizadas combinações série/paralelo de vários módulos, para que se obtenham as tensões e correntes desejadas. Quando vários módulos são conectados em série em um *string*, e vários *strings* são conectados em paralelo para que a potência de projeto seja atingida. Os cabos utilizados nestes sistemas são normalmente resistentes à radiação ultravioleta e têm duplo isolamento. Eles devem suportar as temperaturas elevadas, muitas vezes até 50°C acima da temperatura ambiente, as quais são atingidas na região posterior dos módulos. (RUTHER, 2004)

### 2.5.1. Tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis

Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas comerciais, destacam-se o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou simplesmente a-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre (gálio) e índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS e Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ou CIGS). Estes são citados em ordem decrescente de maturidade e utilização. Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, Ga, In, Cd), ou ambos, o que inicialmente se mostrou um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias (RUTHER, 2004).

O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25 % da crosta terrestre é silício) e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima (SHAH, 1992). O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro ~10cm tipicamente) relativamente espessas (espessura 300- 400µm), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1µm) de material ativo semicondutor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm.

A tecnologia dos filmes finos de silício amorfo (a-Si) apresenta características peculiares, principalmente relacionadas ao desempenho em função da temperatura de operação, e distintas da tecnologia tradicional e difundida do silício cristalino (c-Si). Existe ampla referencia sobre o desempenho superior da tecnologia de filmes finos de a-Si em climas quentes e ensolarados. Por outro lado, a tecnologia de a-Si exibe uma eficiência de conversão fotovoltaica mais baixa (cerca de metade) quando comparada com a tecnologia tradicional de c-Si. (RUTHER et al, 2004)

---

A principal consequência de uma eficiência mais baixa é a maior área total do arranjo fotovoltaico, que implica uma maior estrutura metálica e fiação. Sendo assim, o preço do Wp dos módulos de filmes finos menos eficientes tem que ser suficientemente mais baixo para compensar os custos adicionais em estruturas metálicas de suporte e fiação, bem como da maior área ocupada, principalmente em parques solares em maior escala. “O c-Si segue sendo, no entanto, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala, principalmente porque nos principais mercados mundiais (Japão e Alemanha) a área ocupada por um arranjo fotovoltaico é uma limitação para as tecnologias fotovoltaicas que apresentam uma menor eficiência de conversão.” (RUTHER, 2004)

Ruther (2004) destaca que devido ao fato de que a luz solar contém relativamente pouca energia (baixa densidade energética, da ordem de  $1000 \text{ W/m}^2$  num meio-dia ensolarado) se comparada a outras fontes energéticas, painéis solares fotovoltaicos devem ter um baixo custo para que possam produzir energia elétrica a preços competitivos. O mercado de módulos fotovoltaicos vem crescendo acentuadamente nos últimos anos, com novas tecnologias oferecendo alternativas especialmente desenvolvidas e os preços consequentemente vem caindo. Na Figura 8 são ilustrado alguns módulos de diferentes potências da tecnologia c-Si.

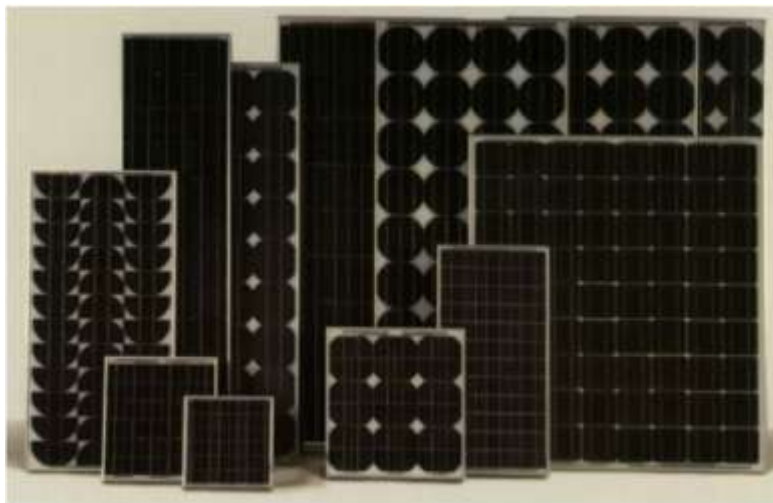


Figura 8 - Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis (Ruther,2004)

Uma preocupação presente é sobre o chamado *energy pay-back time* (tempo necessário para que o módulo gere energia equivalente à utilizada em sua fabricação) A tecnologia que apresenta o pior valor, podendo ser superior a dois anos, dependendo dos níveis de radiação solar do local onde os módulos forem instalados é o silício monocristalino (m-Si), o monocristal é “crescido” em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora) com temperaturas na ordem de 1400°C. O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, com a vantagem de um mais baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do m-Si e o processamento mais simples. O material de partida é o mesmo que para o m-Si que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente. As duas tecnologias representam de forma geral os módulos de silício cristalino.

Já os filmes finos para aplicações fotovoltaicas, principalmente no entorno construído, estão cada dia mais presentes por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em

sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e seu baixo custo de capital (Rüther& Livingstone, 1993).

### 2.5.2. Sistemas de Geração Fotovoltaicos

#### a. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs)

Os SFCRs são constituídos basicamente por: painel FV e inversor. Não são utilizados elementos de armazenamento de energia elétrica. Em resumo, a rede elétrica da concessionária é vista como o elemento armazenador, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede. As principais vantagens desse tipo de sistema são: a alta produtividade (toda a energia gerada pelos módulos é utilizada) e a ausência do banco de baterias (um elemento frágil no sistema fotovoltaico isolado devido à baixa vida útil em relação a dos módulos FV e dos inversores). (URBANETZ JUNIOR, 2010). Na Figura 9 é apresentado um resumo dos tipos e escalas de sistemas fotovoltaicos.

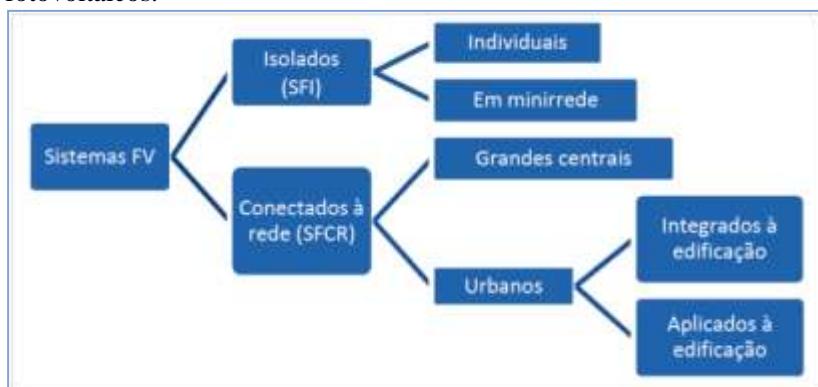


Figura 9 - Tipos de sistemas fotovoltaicos

Fonte: (URBANETZ JUNIOR, 2010)

No caso de os módulos serem conectados à rede é necessário o sistema inversor o qual é *“responsável pela conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos - que geram energia elétrica em corrente contínua (CC) e em tensão normalmente distinta da tensão de*



*rede local - em corrente alternada (CA) e em tensão e frequência de rede, com baixo teor de harmônicos e onda de forma senoidal”* (RUTHER, 2004). A Figura 10 ilustra melhor os componentes e ligações desse tipo de configuração.

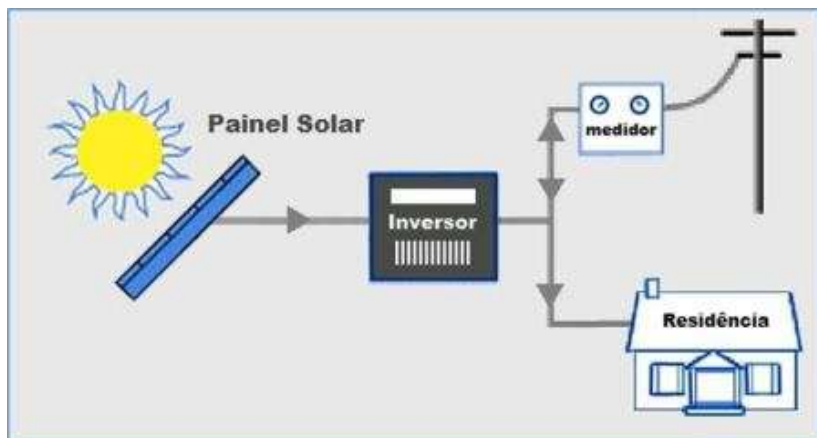


Figura 10 - Diagrama ilustrativo de um sistema conectado à rede.

Estes sistemas podem ser de pequena dimensão, para alimentação de pequenas cargas residenciais ou não residenciais, ou de médio e grande porte constituindo centrais fotovoltaicas com potências instaladas entre dezenas de kW pico chegando a grandes plantas centralizadas na casa do MW pico de instalação.

Os SFCRs representam uma forma de geração renovável de energia elétrica com grande crescimento mundial superando os SFI durante a última década.

### **b. Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI)**

A instalação de sistemas isolados apresenta pequeno crescimento em escala mundial, atendendo principalmente às regiões onde não existe rede elétrica de distribuição. No Brasil este tipo de sistema é empregado principalmente no interior de alguns estados e na Região Amazônica. Em um sistema com armazenamento de energia, é possível utilizar equipamentos elétricos CC independente de haver ou não geração de

---

energia fotovoltaica no período de operação. Exemplos de aplicação são: iluminação, TV, rádio, telefone, etc. Neste caso o uso de controladores de carga é comum visto que, devido as recentes tecnologias das baterias, tem-se exigido um melhor controle do processo de carga e descarga com objetivo de proporcionar um aumento de sua vida útil. Este acessório monitora a carga da bateria e impede que a mesma se descarregue completamente, aumentando a sua vida útil. Já em períodos de grande insolação e pequeno consumo de energia, a bateria tende a se carregar em excesso, aumentando a sua tensão e reduzindo a sua vida útil. O controlador de carga evita este excesso desconectando o módulo (SEGUEL, 2009).

Podemos classificar os sistemas fotovoltaicos com backup em duas tipologias: Sistemas em Série ou Sistemas em Paralelo, os quais se diferenciam pela forma com que o sistema de armazenamento de energia é empregado. A configuração em paralelo é a mais utilizada e caracteriza-se pelo emprego do banco de baterias em paralelo com o fluxo de energia do sistema. A redução do número de estágios condicionadores de energia em série resulta em um aumento na eficiência global do sistema fotovoltaico. Desta forma, esta configuração possui algumas vantagens em relação à configuração série, principalmente pelo fato do banco de baterias, após estar completamente carregado, pode ser desconectado do sistema, podendo a carga ser alimentada apenas pela energia gerada pelos painéis fotovoltaicos (SEGUEL, 2009). A seguir na Figura 11 é apresentado um diagrama que ilustra um sistema autônomo com banco de baterias em paralelo.

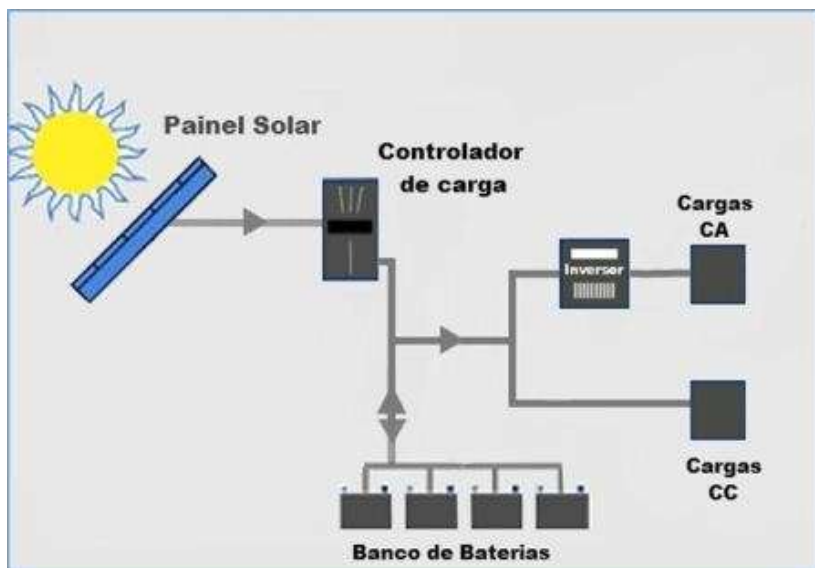


Figura 11 - Diagrama ilustrativo de um sistema isolado.

Nesta configuração, o banco de baterias é utilizado apenas quando a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é inferior à demanda exigida pela carga. Evitam-se assim cargas e descargas desnecessárias, que comprometem a vida útil do banco de baterias. Este tipo de arranjo também permite um melhor controle da carga do banco de baterias e, como apenas a energia necessária para a recarga circula por elas, a vida útil é significativamente maior, se comparada ao sistema série.

### 2.5.3. Componentes de um Sistema Fotovoltaico Isolado

No projeto de um sistema fotovoltaico é necessário conhecer algumas características meteorológicas de onde o sistema será instalado e o consumo da carga a alimentar, pois esses dois fatores influem diretamente no correto dimensionamento do sistema. A determinação do consumo resume-se a realizar o levantamento da potência dos equipamentos a serem utilizados e as horas de uso estimadas por dia, para que se quantifique o consumo de energia.

---

Outro dado indispensável para um bom projeto de um sistema fotovoltaico são os índices de incidência de radiação solar na localidade onde o sistema será implantado. É importante assinalar que o sistema fotovoltaico deve garantir o fornecimento de energia durante todos os meses do ano. Por essa razão, no dimensionamento do sistema fotovoltaico isolado ou autônomo deve-se considerar o menor índice de radiação durante o ano. (SEGUEL, 2009). A seguir apresentam-se os componentes principais do sistema:

#### **a. Arranjo fotovoltaico**

Segundo Seguel (2009) para se fazer um correto dimensionamento do painéis fotovoltaico, como dos demais componentes do sistema, é importante conhecer, além das condições de radiação da localidade na qual o sistema vai ser implantado e das características da carga, outros parâmetros também relevantes. Faz-se necessário conhecer quais serão os níveis de tensão em que o sistema operará e, além disso, quais serão as perdas estimadas dos componentes do sistema fotovoltaico.

O cálculo da capacidade mínima de geração dos módulos fotovoltaicos é determinado por meio da energia solar acumulada durante o dia, na localidade onde o sistema será instalado. Uma forma conveniente de se expressar o valor acumulado desta energia é através do número de horas do sol pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a  $1 \text{ kW/m}^2$  de forma que a energia resultante seja equivalente à energia acumulada durante o dia (GUIMARÃES, 2004).

Pode-se dizer então que o valor de  $4,5 \text{ kWh/m}^2$  de radiação diária é produzido por 4,5 horas de potência incidente constante e igual a  $1000 \text{ W/m}^2$  (valor padrão). Os parâmetros adotados para o cálculo do arranjo de painéis fotovoltaicos e demais componentes do sistema são:

- Carga instalada (W)
- Consumo diário de energia (Wh/dia)
- Radiação diária média mensal ( $\text{kW/m}^2$ )
- Tensão de operação do sistema C.C (V)

- 
- Eficiência do Sistema (Módulos, fiação , banco de baterias ,conversor C.C.)

## **b. Banco de baterias**

Devido a variação das condições climáticas, é necessário que as baterias armazenem energia suficiente, não só para um período noturno, mas também para intervalos maiores com radiação solar abaixo da média. O equipamento deva ter uma autonomia de 2 dias (de acordo com a resolução normativa nº 83, de 20 de setembro de 2004 da ANEEL que determina este valor como mínimo para sistemas de baixo consumo diário) e que, ao voltar de uma condição de máxima descarga, que ele se recarregue completamente em 3 dias normais de sol.

Como a energia solar é variável e depende das condições atmosféricas, a aplicação de um sistema de armazenamento que garanta o fornecimento de energia à carga durante a noite ou em períodos com déficit de sol é imprescindível. Nos sistemas autônomos o banco de baterias junto com os painéis fotovoltaico são os componentes de maior custo. Devido à necessidade de manutenção, e à menor vida útil das baterias em comparação com os módulos é importante uma boa escolha dos métodos de carga e descarga das baterias a fim de garantir uma prolongada vida útil. Há uma grande variedade de baterias, com diversas capacidades de armazenamento e estas podem ser arranjadas em série e/ou paralelo de acordo aos requerimentos do sistema.

Para o projeto do banco de baterias, dois parâmetros devem também ser considerados: (1) a autonomia do sistema e (2) a profundidade de descarga das baterias. A autonomia do sistema corresponde ao número de dias nos quais a energia armazenada no banco de baterias supre a demanda necessidade de reposição da energia pelos painéis fotovoltaicos. Este parâmetro representa a confiabilidade do sistema fotovoltaico, entretanto o aumento do número de dias de autonomia do sistema acarreta em um aumento direto nos custos do banco de baterias e conseqüentemente do sistema (GUIMARÃES, 2004).

A profundidade de descarga de uma bateria está relacionada diretamente com a sua vida útil. Como se pode observar na Figura 12 utilização de

uma profundidade de descarga elevada faz decair significativamente a vida útil.

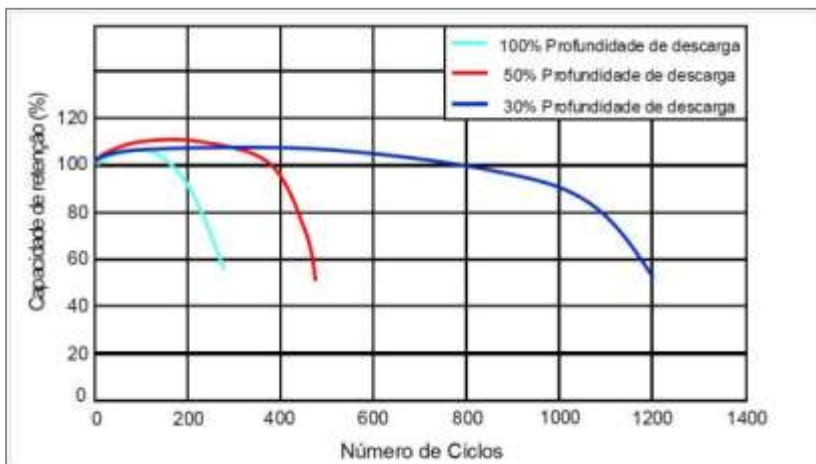


Figura 12 - Curva da capacidade de retenção em função do número de ciclos (carga-descarga) para baterias de chumbo ácido do fabricante Newmax. Fonte: Seguel (2009)

Atualmente, as baterias chumbo-ácido e níquel-cádmio são as mais utilizadas, todavia, tecnologias como níquel-ferro, sódio-enxôfre e níquel-hidrogênio são muito promissoras. Para o caso específico de Sistemas Fotovoltaicos as baterias chumbo-ácido respondem pela quase totalidade dos sistemas já instalados e tem-se dado preferência às abertas para sistemas grandes e às seladas para sistemas pequenos (GUIMARÃES, 2004). Na Tabela 2 listam-se diferentes tipos de baterias e suas características.

Tabela 2 - Principais tipos de baterias , aplicação e faixa de operação (Ah). (GUIMARÃES, 2004)

Tipo	Disponibilidade/Aplicação	Ah
<b>Sistemas convencionais:</b>		
- Chumbo-ácido, aberta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplamente disponível e usada nas áreas de telecomunicações e transporte</li> <li>• Principal tipo utilizado em aplicações fotovoltaicas</li> <li>• Disponível no mundo inteiro</li> </ul>	50-10.000
- Chumbo-ácido, selada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplamente utilizada em veículos automotivos e aplicações na área de telecomunicações</li> </ul>	60-6.000
- Níquel-cádmio		
• aberta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplamente disponível e usada para aplicações estacionárias, carros, telecomunicações e UPS</li> </ul>	50-600
• selada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usada principalmente em pequenas unidades (tamanhos AA e D)</li> <li>• Naves espaciais</li> </ul>	10 50
- Níquel-ferro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fontes limitadas</li> </ul>	

### c. Controlador de carga

Os controladores de carga são incluídos na maioria dos Sistemas Fotovoltaicos (SFs), com os objetivos de facilitar a máxima transferência de energia do painel fotovoltaico para o banco de baterias e protegê-las contra cargas e descargas elevadas, aumentando, desta forma, a sua vida útil. Podem ser chamados de gerenciadores ou reguladores de carga ou tensão. Os controladores devem desconectar o arranjo fotovoltaico quando a bateria atinge carga plena e interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria atinge um nível mínimo de segurança. Alguns controladores também monitoram o desempenho do SF (tal como corrente e tensão de carregamento da bateria ou da carga) e acionam alarmes, quando ocorre algum problema.

---

Para melhorar o desempenho do controlador de carga, pode-se ainda acoplar a ele um sensor de temperatura de forma a compensar o efeito da variação da temperatura nos parâmetros das baterias. (GUIMARÃES, 2004)

Na especificação deste equipamento, inicialmente é importante verificar o tipo de acumulador a ser utilizado e o regime de operação do sistema. Na sequência, calcula-se a tensão e corrente de operação do sistema. Segundo Guimarães (2004) para valores elevados de corrente de operação, o custo do controlador aumentará significativamente e a disponibilidade no mercado reduzirá. Baterias e controladores de carga possuem uma íntima relação e só é possível entender a operação dos controladores se o comportamento das baterias for também conhecido.



---

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

As etapas metodológicas utilizadas neste trabalho estão apresentadas na sequência. Os métodos utilizados baseiam-se no estudo desenvolvido na Universidade de Berkeley na Califórnia – EUA por (COHN, 2002).

O trabalho dividiu-se em 3 etapas:

#### **ETAPA 1.**

Estudo das variáveis interferentes no processo e desenvolvimento de um modelo matemático para cálculo teórico da dose UV transmitida. Buscou-se assim investigar os valores de tempo de exposição e consequente dose transmitida ao volume de água e respectiva taxa de desinfecção. Assim analisaram-se as possíveis configurações físicas do reator e parâmetros de entrada e a expectativa de resultados, ditando faixa de operação a serem seguidas.

#### **ETAPA 2.**

Em seguida, avaliou-se o desempenho do reator de desinfecção através de ensaios bacteriológicos. Foram feitas as devidas variações dos parâmetros de entrada principalmente de qualidade de água e tempo de detenção para se chegar a faixas de operação e eficiência.

#### **ETAPA 3**

Finalmente, na terceira etapa, analisou-se o potencial necessário de instalação fotovoltaica e configuração elétrica para atender a demanda energética do reator visando sua autonomia em regiões não atendidas pela rede elétrica.

#### **3.1. Local do experimento**

Para examinar o funcionamento do reator de desinfecção de água ultravioleta foi necessário realizar a sua concepção e viabilizar a oferta de água para abastecê-lo. O local onde os testes foram realizados localiza-se no terraço do Bloco A1 da Engenharia Mecânica, no Centro Tecnológico – Campus Universitário da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 13).



Figura 13 - Bloco A1 Eng. Mecânica, local dos experimentos.

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA) e no Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOA) ambos no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Os procedimentos foram supervisionados pelo Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens. Orientador da pesquisa.

### **3.2. Modelo matemático de desinfecção**

Com intuito de melhor compreender o comportamento do processo, foi elaborado um modelo teórico/matemático para estimativa da dose de radiação transmitida à água. O modelo matemático é fundamentado na velocidade de escoamento em canais e na radiação que atinge a lâmina d' água. Dessa forma o modelo permite a verificação da

dose transmitida para água, a qual é calculada através da integração do tempo de percurso (tempo de exposição da água à radiação) com a intensidade por unidade de área (irradiância) que atinge a lâmina d' água. Foram adotados parâmetros de entrada interferentes no processo para identificar de forma teórica mudanças na dose para essas variações.

Os parâmetros e equações utilizadas são apresentados nos itens 3.3 e 3.4, determinação da intensidade de potência transmitida e determinação do tempo de detenção, respectivamente. O software Microsoft Office Excel foi utilizado para os cálculos e geração de gráficos.

### 3.3. Determinação da intensidade de radiação transmitida

A intensidade de radiação foi calculada apenas de forma teórica, A medição poderia ser feita com sensores especiais (transdutores de banda curta) em diferentes pontos do protótipo, esses instrumentos, no entanto, são de difícil e cara aquisição.

Sabe-se que a potência da lâmpada germicida sofre varias perdas até efetivamente atingir a lâmina d' água. Considera-se para esse cálculo a eficiência da lâmpada, distâncias geométricas, perdas com dispersão e atenuação da luz UV. Na Tabela 3 são mostrados as principais variáveis utilizadas.

Tabela 3 - Dados de entrada do modelo matemático de desinfecção. As variáveis consideradas no modelo teórico foram apresentadas de forma literal.

Variáveis no modelo de radiação	Legenda
<b>Coefficiente de Absorção da água</b>	<b>(<math>\alpha'</math>)</b>
<b>Diâmetro da lâmpada germicida</b>	<b>(Si)</b>
<b>Diâmetro do tubo de PVC</b>	<b>(2 r)</b>
<b>Altura da lâmina d' água</b>	<b>(h)</b>

---

<b>Distância da lâmpada para a superfície da água</b>	<b>(L)</b>
<b>Distância da lâmpada para o tubo de PVC</b>	<b>(d)</b>
<b>Eficiência Lâmpada e de seu reator eletrônico</b>	<b>(<math>\eta</math>)</b>
<b>Largura da superfície da água</b>	<b>(2 L)</b>
<b>Perda determinada pela refletância do alumínio</b>	<b>(<math>\alpha</math>)</b>

---

O diâmetro do tubo de PVC foi fixado no valor de 100 mm. Distância da lâmpada para o tubo de PVC (parte superior) é de 1,5 cm. A distância da lâmpada para a superfície da água, bem como a largura da superfície da água é variável e depende da vazão no caso do protótipo não possuir limitador de nível. O diâmetro da lâmpada germicida é padrão e a eficiência de seu reator eletrônico foi adotada. A perda determinada pela refletância do alumínio ( $\alpha$ ) foi adotada com referência de Lindseth et al.(1999).

A refletância de uma superfície determina a relação  $I_r/I$ , onde somente uma parte da radiação ( $I$ ) na qual a superfície é exposta é refletida por esta, a qual é denominada como  $I_r$ . A refletância do alumínio  $\alpha$ , por exemplo, após o seu processo de fabricação pode variar em função do seu tratamento de superfície entre 77,6 e 90% (Lindseth et al., 1999), considerando (i) ou processos de oxidação ou (ii) o tratamento de sua superfície com verniz transparente para evitar o processo de oxidação.

As equações (1) e (2) foram utilizadas para estimar a quantidade de radiação que chega a lâmina d ' água. A Figura 14 sintetiza a simbologia das grandezas geométricas utilizadas.

$$F_{ij} = \frac{r}{si} \tan^{-1}(si/L) \quad \text{Equação 1}$$

$$F_{ji} = (1 - F_{ij}) \quad \text{Equação 2}$$

Essas equações foram elaboradas a partir do modelo o qual descreve a troca da radiação entre um cilindro e um retângulo

(INCROPERA, 2001) e permitem estabelecer duas taxas ou parcelas da radiação. (i) A parcela da radiação que chega à superfície da água de forma direta ( $F_{ji}$ ) é definida como a radiação emitida por um cilindro, a lâmpada fluorescente, e é recebida por uma área retangular. E (ii) a parcela que atinge a água de forma indireta ( $F_{ij}$ ). A parcela  $F_{ij}$  é refletida através das paredes do tubo e do refletor que se localiza na parte superior do tubo e é recebida pela superfície retangular da água. No presente cálculo aproximado é considerado um revestimento completo do tubo com um refletor de  $\alpha$  constante. A potência da radiação a qual é recebida pela superfície  $P_{sf}$  é calculada como segue na Equação 3.

$$P_{sf} = P_{el} \eta (F_{ji} + F_{ij} \alpha)$$

Equação 3

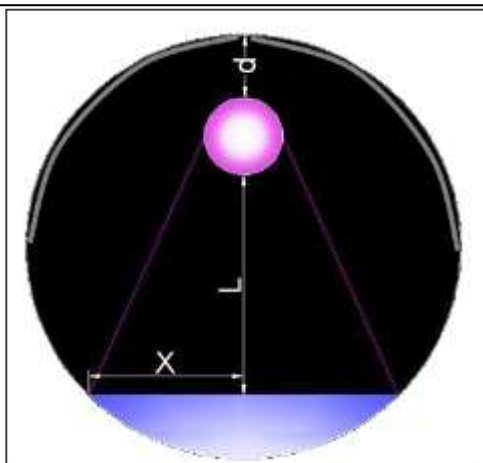
Onde  $P_{el}$  é a potência elétrica da lâmpada.

$\eta$  - rendimento da lâmpada

$F_{ji}$  – radiação diretamente transmitida

$F_{ij}$  – radiação refletida

$\alpha$  – refletância do material reflexivo



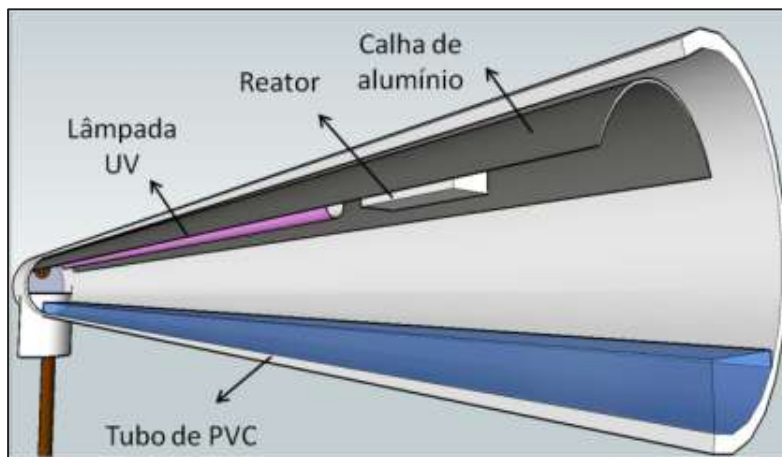


Figura 14 - Perfil e corte do tubo e variáveis geométricas interferentes na dose de radiação.

Foram simuladas através do modelo águas com diferentes coeficientes de absorção, relativamente elevados, transpondo os valores encontrados em águas potáveis. O Coeficiente de Absorção da água ( $\alpha'$ ) é proporcional a turbidez e concentração de sólidos presentes na água. É necessário verificar o reflexo desses parâmetros de interesse na desinfecção, detectar, assim a fronteira de vazão para diferentes tipos de água (turbidez e cor). Estes resultados podem ser usados para uma futura calibração eletrônica do protótipo.

A equação (4) (BLATCHLEY, 1997) foi utilizada para calcular a referida atenuação.

$$I = I_0 \times e^{-\alpha h} \quad \text{Equação 4}$$

- °  $\alpha'$  - coeficiente de absorção
- ° h - altura lâmina d' água ( $2r - d - si - L$ )
- °  $I_0 = P_{sf}$  - intensidade inicial encontrada na superfície da água

Este efeito e suas características é melhor elucidado na sequência quando é descrita a influência da qualidade da água e subprodutos.

### 3.4. Determinação do tempo de detenção

O comportamento hidráulico da água dentro do reator deve ser bem compreendido, pois reflete diretamente no tempo de exposição e dose transmitida para a água. O perfil de escoamento e desenho da lâmina d' água é diferente para diferentes vazões e diâmetros. O esterilizador modelado pode ser apresentado de duas diferentes formas: o primeiro possui um controlador de nível de água (vertedor na saída, ditando o nível de água dentro do reator) e o segundo de forma contrária tem a saída pelo fundo (sem vertedor) permitindo apenas a formação de uma pequena altura de lâmina de água.

Neste último o cálculo de tempo de escoamento é mais complexo e menos preciso. A expressão utilizada para calcular a vazão e velocidade de escoamento teórica é a fórmula de Manning (Eq. 5) a qual é amplamente aplicada para cálculos de escoamento em dutos livres, como canais de drenagem, redes de esgoto, etc.

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad \text{Equação 5}$$

- ° Rh (raio hidráulico) = área molhada da seção transversal / perímetro molhado.
- ° N = 0.012 (PVC)
- ° I = 0.007 m/m

A rugosidade das paredes dos canais e tubulações é função do material dos quais são construídos, do acabamento e do tempo de uso. Azevedo Neto (1998) indica para canais lisos conduzindo água limpa, o valor de  $n = 0,012$ . A fórmula de Manning é teórica e normalmente aplicada a dutos com longos comprimentos, onde a distância entre entrada e saída é dita infinita. Neste caso é utilizado um tubo de comprimento restrito, será preciso, assim, uma calibração. Na fórmula a velocidade é inversamente proporcional à rugosidade ( $n$ ) e ao perímetro molhado.

Estes dois parâmetros representam a resistência ao fluxo. Por outro lado a velocidade é diretamente proporcional a área da seção molhada e inclinação do duto. Para este último parâmetro foi adotado o valor virtual de 0,007m/m, o tubo, no entanto, é instalado na horizontal (inclinação 0°). Esta medida foi tomada como calibração da fórmula para o caso estudado.

O cálculo do tempo de exposição foi realizado dividindo-se o comprimento da lâmpada pela velocidade atingida da água:

$$T' = \frac{S}{V} \quad \text{Equação 6}$$

- °  $S$  = Deslocamento (comprimento da Lâmpada)
- °  $V$  = Velocidade do escoamento

Para a configuração com vertedor o tempo de exposição é mais facilmente calculado através da expressão Volume Reservado/Vazão.

$$T'' = \frac{V}{Q} \quad \text{Equação 7}$$

- °  $V$  = Volume reservado (área transversal x comprimento da lâmpada)
- °  $Q$  = Vazão

O tempo de detenção foi calibrado através da utilização de um cronômetro e um condutivímetro para identificar o período decorrido após a adição de sal (cloreto de sódio) na entrada do reator. Assim verificou-se qual é o tempo de permanência da água no reator (contato com a radiação emitida pela lâmpada).

### **3.5. Verificação da eficiência de desinfecção através de ensaios bacteriológicos**

Dose, como já explicado, é o produto entre a irradiância e tempo de exposição. A irradiância é função da potência da lâmpada e diminui com a distância a partir do bulbo devido à atenuação e a dissipação. A geometria do reator e a composição da água determinam a rapidez com



---

a irradiância diminui com a distância a partir do bulbo. O tempo de exposição é regido pela geometria e hidrodinâmica do reator. Dose é mais comumente medida em  $\text{mWseg} / \text{cm}^2$  (equivalente a  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) (COHN, 2002). A dose necessária para vários níveis de inativação de organismos diferentes são mostrados na Figura 15. No modelo teórico foi usada a dose de  $40 \text{ mWs}/\text{cm}^2$  como mínimo a ser alcançado.

Para demonstrar as vazões limites de funcionamento para diferentes hipóteses de interferência da qualidade da água (turbidez e cor principalmente) além do modelo matemático é necessária a realização de testes práticos utilizando-se águas com parâmetros de interesse controlados.

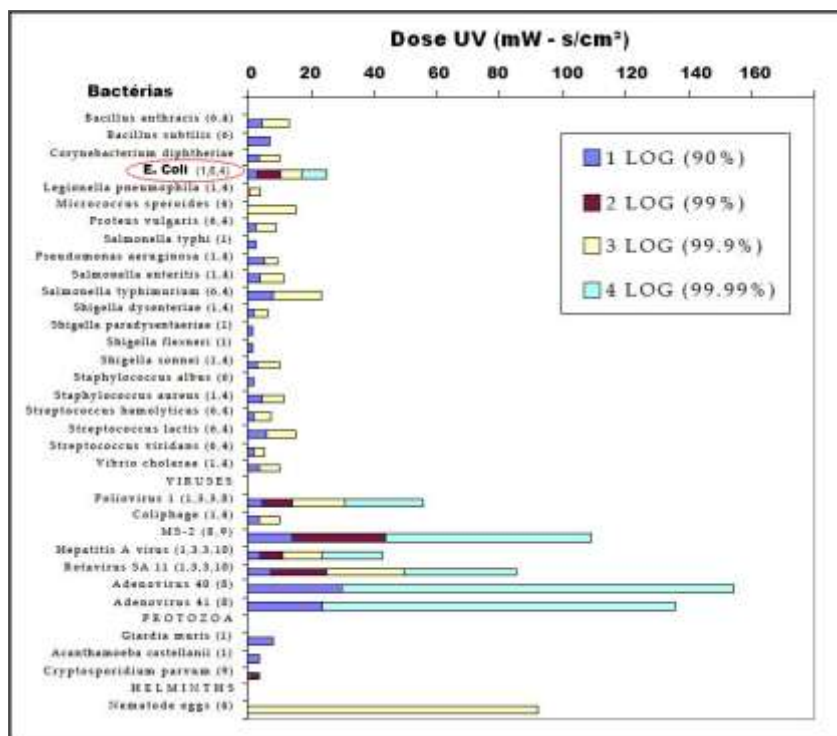


Figura 15 – Dose-Resposta UV Dose para diferentes categorias de microrganismos. (Fonte: COHN, 2002)

A carga contaminante foi obtida através de amostras de esgoto doméstico coletado em uma caixa de passagem do mesmo prédio onde foram realizados os experimentos. Para simular diferentes coeficientes de absorção tivemos a adição de concentrações controladas de bentonita às amostras. A água utilizada teve origem da rede pública de abastecimento. Para alimentar a lâmpada e simular sistema fotovoltaico com bateria foi utilizada uma fonte com controle de tensão, a qual foi ajustada a 12 V estáveis.

Identificadas as faixas de vazão de interesse foram realizados testes com fluxo de 5 e 10 litros por minuto. Iniciaram-se os experimentos com a água com turbidez de 30 uT e carga contaminante

---

moderada e coeficientes de absorção já elevados. O intuito foi delimitar níveis superiores de funcionamento. Posteriormente foram mantidas condições próximas, porém com cargas contaminantes maiores para melhor caracterizar os níveis de redução alcançados. Através da identificação da redução logarítmica de *E. coli* estimou-se a dose transmitida através do levantamento de Cohn (2002) para que fosse possível fazer a validação do reator através da técnica biológica de bioensaio. Na Figura 15, em destaque, aparece a dose necessária para redução de 1 a 4 LOG na carga da bactéria *E. coli*. Este microrganismo é um conhecido indicador de qualidade de água, bem como o método laboratorial utilizado para quantificação. Tendo em vista estas considerações escolheu-se este indicador para a validação da dose transmitida no reator. Na imagem observa-se que com cerca de 30 mWs/cm<sup>2</sup> se atinge uma redução da ordem de 4 LOG, assim temos um bom padrão de comparação.

Os procedimentos analíticos dos ensaios microbiológicos seguiram a metodologia Colilert Quanti-Tray 18. Foram realizados ensaios físico-químicos para uma avaliação da condição geral da água utilizada nos experimentos que seguiram os métodos conforme Standard Methods for Water and Wastewater, 21TH Edição de 2005.

### **3.6. Determinação do sistema de geração fotovoltaica**

Dois fatores influenciam diretamente no correto dimensionamento de um sistema fotovoltaico: as características meteorológicas do local onde o sistema será implementado e o consumo de energia da carga a alimentar.

Além dos painéis solares, as baterias, os controladores e inversores são os principais acessórios presentes em um sistema solar fotovoltaico e devem ser dimensionados adequadamente. A seguir é apresentada a metodologia de dimensionamento para o sistema isolado de interesse do estudo. (SEGUEL, 2009)

#### **a. Consumo de energia elétrica esperado**

As cargas isoladas são na maioria das vezes de baixo consumo, localizadas em zonas rurais, distantes da rede de energia, apresentando

características similares. É preferível que todas as cargas sejam alimentadas por corrente contínua, sem a necessidade do inversor, assim evitam-se perdas inerentes dos equipamentos e o sistema torna-se mais eficiente. (GUIMARÃES, 2004)

Normalmente listam-se as cargas de interesse com suas respectivas potências nominais, como é apresentado na Tabela 4. É importante definir o tempo diário de uso do aparelho para que se encontre o consumo de elétrico deste aparelho e seja possível chegar ao consumo total de energia que deve ser atendido pelo sistema gerador.

Tabela 4 - Consumo diário de energia de um sistema isolado

Item	Cargas	Potência [W]	Tempo de uso [h]	Consumo [kWh]
1	A	P1	T1	P1xT1
2	B	P2	T2	P2xT2
3	C	P3	T3	P3xT3
4	D	P4	T4	P4xT4

$$\text{Consumo} = (\text{Potência} \times \text{Tempo de Uso}) \quad \text{Equação 8}$$

$$\text{Consumo Total} = \Sigma(P1 \times T1, P2 \times T2, P3 \times T3, P4 \times T4)$$

O cálculo do consumo de um sistema isolado é sempre baseado em um período diário para que posteriormente esse valor seja comparado ao valor de oferta solar de um dia e possamos fazer o correto dimensionamento.

## **b. Recurso solar disponível na localidade**

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução) (BRASIL, 2011).

Deve-se desta maneira localizar geograficamente a cidade em questão e buscar os valores das médias mensais de radiação global horizontal diária em  $\text{Wh/m}^2$ . Para um estudo mais preciso, calculam-se os valores de irradiação incidente no plano dos arranjos fotovoltaicos propostos através de alguns softwares, como o Radasol, programa que possibilita o cálculo da irradiação solar incidente em superfícies de diferentes orientações (UFRGS, 2001). Os dados do programa são calibrados com os valores de irradiação média diária mensal global e horizontal fornecidos pelo Atlas Brasileira de Energia Solar, desenvolvido pelo projeto SWERA (PEREIRA et al.;2006).

Para dimensionamento de sistemas isolados deve-se considerar a mais baixa irradiação encontrada durante o ano para que o sistema funcione de forma ininterrupta. Na Figura 16 percebe-se a diferença de oferta solar na curva ilustrativa de uma localidade do hemisfério sul.

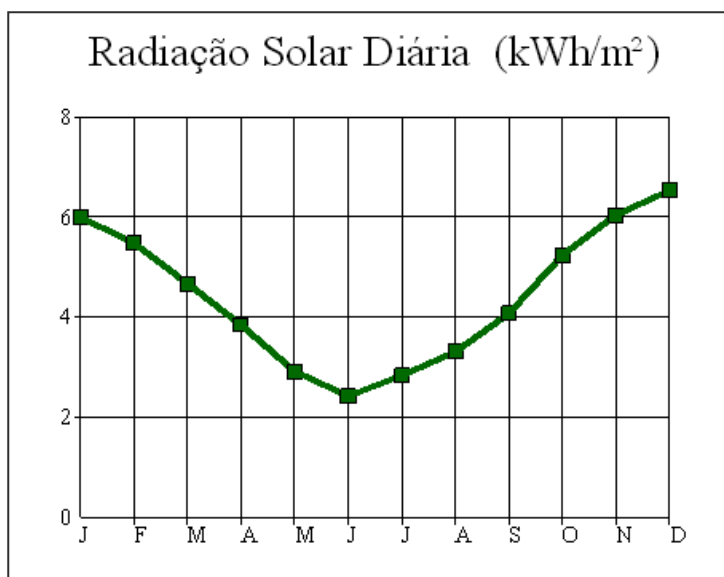


Figura 16 – Comportamento típico anual da radiação solar diária em localidades do hemisfério sul. Gráfico gerado pelo software Radasol

---

### c. Dimensionamento do Pannel (Potência necessária)<sup>1</sup>

A potência pico necessária é calculada tendo-se os seguintes dados em mãos:

- Energia Consumida [Wh]
- Irradiação [GPOA\*] [kWh/m<sup>2</sup>]
- Fator de Eficiência [ $\eta$ ]

$$P_{cc} = (E/G)/\eta$$

Equação 9

A estimativa do fator de eficiência é um importante passo no dimensionamento de um sistema, o correto cálculo do rendimento aproxima o projeto do real cenário encontrado na prática, fazendo com que se minimizem imprevistos e preocupações futuras. É essencial também prever um coeficiente de segurança, 10 – 30% para que se assegure funcionamento do sistema em condições de consumo elevado ou baixa oferta solar inusitados. (SEGUEL, 2009)

No cálculo do rendimento deve se estipular a eficiência de todos os componentes do sistema e também qual a porcentagem de vezes que a energia percorrerá o caminho passando pelos equipamentos descritos. Analisando o diagrama do sistema como o da Figura 11 por exemplo, identifica-se 3 trajetos possíveis: pannel → inversor → cargas CA; pannel→baterias → cargas CC e pannel → cargas CC.

### d. Dimensionamento do Acumulador

Para dimensionamento do acumulador, devemos levar em consideração o número de dias de reserva, em caso de condições de pouca irradiação solar e a capacidade da bateria para uma descarga profunda sempre inferior a 50% da capacidade nominal. Desta maneira devemos selecionar um acumulador com uma capacidade igual ao dobro ou mais da capacidade calculada a partir dos valores de consumo, vezes o número de dias de reserva necessário dividido pela tensão do sistema.

---

<sup>1</sup> GPOA: Pior oferta anual de irradiação

$$C = \frac{(\text{Consumo} * \text{Reserva} / \text{Tensão})}{\text{Fator de Descarga}} \quad \text{Equação 10}$$

C = Capacidade da bateria (Ah)

Reserva = Dias de autonomia previstos

Consumo = demanda diária (kWh/m<sup>2</sup>)

Tensão = Tensão do sistema (bando de baterias)(V)

Fator de Descarga = porcentagem de uso da carga total da bateria

### e. Controlador de carga

Escolhido o modelo do módulo fotovoltaico deve verificar sua tensão de máxima potência para saber qual eficiência é requerida do controlador de carga, o qual faz a interação entre a geração e os acumuladores.

Calcula-se a corrente máxima do sistema dividindo-se a potência máxima das cargas pela tensão do sistema (banco de baterias). O controlador deve ter capacidade de corrente maior que a encontrada nesse cálculo.

$$\frac{(TCA - (dT * (-\text{Coef.T}))) * TMaxP}{TCA} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

TCA – Tensão de circuito aberto

TMaxP – Tensão de máxima potência

dT – Variação da temperatura

Coef. T. – Coef. de temperatura

## 3.7. Materiais e aparelhos para realização dos testes

São apresentados na sequência os principais materiais e equipamentos necessários para concepção do protótipo e a efetivação dos testes e análises. Tendo em vista que uma premissa do projeto é o protótipo seja de fácil concepção e facilmente replicável o processo de montagem do protótipo é também descrito. A Figura 17 representa o esquema do sistema do reator germicida proposto.

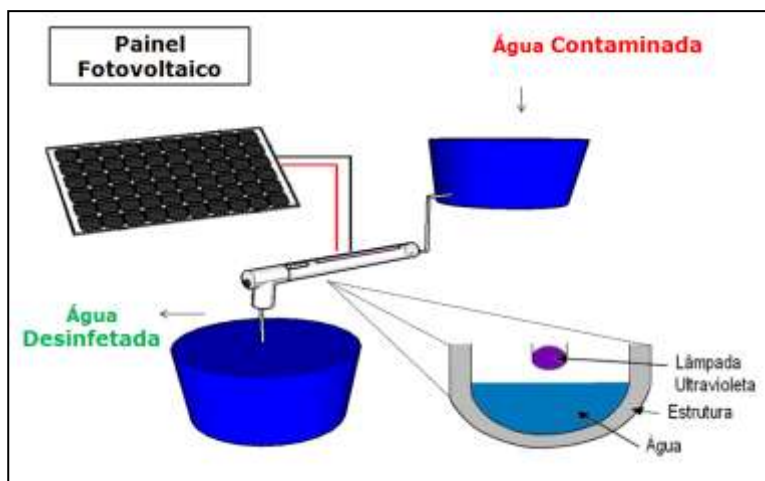


Figura 17 - Esquema do sistema do reator germicida proposto.

### 3.7.1. Lâmpada tubular

A fonte emissora de luz UV mais comumente encontrada no mercado é a lâmpada ultravioleta tubular. Mais recentemente, pode-se encontrar também no mercado os diodos emissores de luz, mais conhecidos como LEDs (Light Emitting Diodes). A Tabela 5 mostra uma comparação entre as características de cada uma destas fontes de luz. Pela maior disponibilidade das lâmpadas tubulares no mercado nacional, elas serão utilizadas neste projeto.

Tabela 5 - Análise Comparativa entre lâmpada ultravioleta tubular e Diodo Emissor de Luz, LED.

Característica LED Tubular	LED	Tubular
Comprimento de onda (nm)	250-300	254
Robustez (física)	Alta	Baixa
Potência elétrica	Baixa	Média
Tempo de exposição	Alto	Baixo



---

Vida útil (h)	100.000	4.000-10.000
Oferta	Baixa	Alta

---

Fonte: KHAN, 2006.

Sistemas pressurizados com lâmpadas submersas possuem o bulbo disposto no meio do tubo, assim o comprimento do trajeto de luz é menor, praticamente dobrando a eficiência do processo (COHN, 2002). Nestes projetos o bulbo e os fios são envolvidos em uma camada de quartzo, de modo a isolar a parte eletrônica da água e proteger o bulbo contra flutuações de temperatura. Água gelada pode diminuir o rendimento do bulbo ou quebrar o invólucro de quartzo. Sistemas que utilizam o sistema com o bulbo sob a água apresentam aspectos positivos no que diz respeito à redução no acúmulo de sujeira no bulbo e eletrônica separada da água. Estes dois elementos criam um sistema barato e fácil de ser construído. A Figura 3 exemplifica as duas configurações com bulbo sobre a água e bulbo imerso na água.

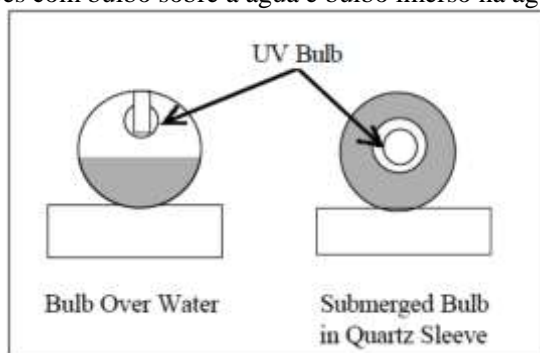


Figura 18 - Bulbo sobre e imerso na água.(NOGUEIRA, 2003)

### 3.7.2. Demais Materiais Utilizados

Na Figura 19 é mostrado em detalhe a ilustração do reator, na sequência são listados todos os materiais usados na confecção do reator.

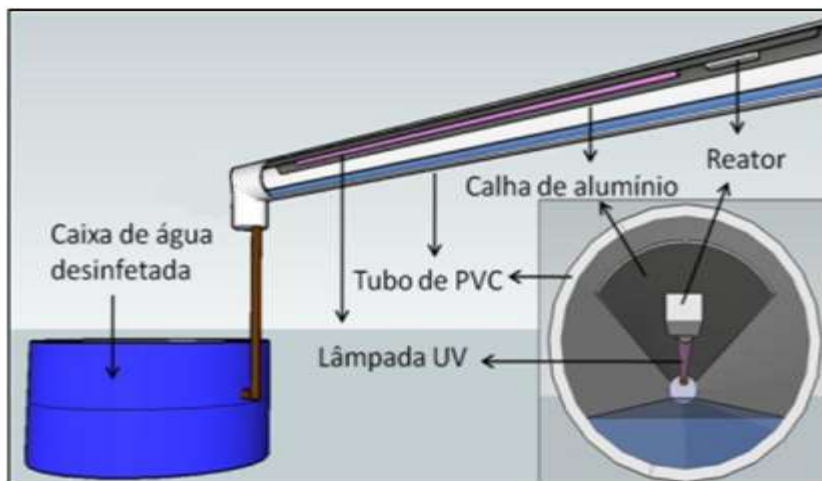


Figura 19- Ilustração dos perfis do reator.

### **Materiais utilizados:**

- 1 tubo de PVC DN 100 mm de diâmetro e 1,40 m de comprimento
- 1 joelho curto de PVC DN 100 mm de diâmetro
- 3 flanges
- 2 Caps
- 1 calha de alumínio de 1,40 m de comprimento
- 1 lâmpada fluorescente tubular germicida – T8 30 W, marca G-Light com 89,5 cm de comprimento
- 1 reator
- 2 m de comprimento de fio flexível preto
- 60 cm de comprimento de fio flexível vermelho
- 60 cm de comprimento de fio flexível preto
- 2 soquetes para lâmpadas fluorescentes base G13 – “cebolinhas”
- 2 abraçadeiras para lâmpada fluorescente
- 4 parafusos com porcas e arruelas

- 
- Alicate
  - Furadeira
  - Brocas
  - Serra copo
  - Trena
  - Chave de fenda
  - Fita isolante
  - Segueta
  - Estilete
  - Ferro de solda
  - Estanho

### **3.7.3. Materiais e equipamentos para medições**

Abaixo são listados os materiais e equipamentos utilizados para a realização das análises e medições que compuseram o trabalho de pesquisa:

- Cronômetro
- Becker 600, 2000, 4000 ml.
- Luvas
- Inclínômetro
- Medidor Infravermelho de temperatura.
- Voltímetro
- Fonte de alimentação
- Turbidímetro HACH 2100 N
- Espectrofotômetro – HACH DR 2800 para medição de cor (465nm)
- Espectrofotômetro UV – medição de absorbância – 254nm

### **3.7.4. Análise bacteriológica**

As concentrações de microrganismos foram obtidas através de processo cromogênico, utilizando-se reagentes e cartelas da Tecnologia de Substrato Definido da IDEXX® Laboratories, Inc. Os materiais para este teste incluem os seguintes itens, todos da IDEXX/USA:

- Frasco estéril com Tiosulfato de sódio – 120 ml

- 
- COLILERT – Substrato definido enzimático ONPG-MUG
  - CARTELA QUANTI-TRAY 2000 - 97 CAVIDADES

Para simulação da turbidez foi utilizada bentonita da marca Soleminas, Indústria e Comércio de Minerais Ltda doada pelo laboratório de mecânica dos solos – ECV.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados Teóricos.

Na Tabela 6 são apresentadas as variáveis utilizadas no modelo matemático confeccionado para o cálculo da dose teórica transmitida no reator. As variáveis são divididas em Elétricas: potência e rendimento da lâmpada; Geométricas: diâmetro da lâmpada e do tubo de PVC, distâncias entre a fonte de emissão de radiação e a água, área da superfície da água a receber a radiação; Físicas: perda de reflexão do alumínio (componente do refletor dentro do reator), coeficiente de absorção (resultado da qualidade da água utilizada no processo).

As variáveis de 1 a 4 são os principais parâmetros de entrada do modelo. Os itens 5 e 6 refletem a variação dos parâmetros de entrada e os demais itens são fixos representando principalmente os valores geométricos e físicos característicos do reator e materiais utilizados.

Tabela 6 - Variáveis presentes no modelo teórico e valores utilizados.

Variáveis do Modelo	Valores
1. Potência da lâmpada	8, 15, 30 W
2. Comprimento das lâmpadas	30,45, 90 cm
3. Coeficiente de Absorção da água ( $\alpha'$ )	0,2 – 0,9
4. Vazão de entrada	1 -10 l/min.
5. Distância da lâmpada para a superfície da água (L)	Variável
6. Largura da superfície da água (2 L)	Variável
7. Diâmetro do tubo de PVC (2 r)	100
8. Eficiência Lâmpada e de seu reator eletrônico (h)	0,3
9. Perda determinada pela refletância do alumínio ( $\alpha$ )	0,4
10. Diâmetro da lâmpada germicida (Si)	18 mm
11. Distância da lâmpada para o tubo de PVC (d)	15 mm

---

Com o objetivo de melhor apresentar os resultados e facilitar análise dos valores e curvas encontradas, a variável que representa a qualidade da água (coeficiente de absorção) foi estabelecido em 2 valores. O primeiro, 0,3, representa uma água de melhor qualidade com uma turbidez provável de 5 a 10 uT e o segundo, 0,8, representa uma água com carga orgânica mais significativa o que representa uma turbidez de 20 a 30 uT.

Vale destacar a importância da análise das diferentes potências das lâmpadas germicidas, além de terem papel fundamental na intensidade de radiação, refletem o tempo de detenção que é diretamente ligado ao comprimento da lâmpada e seu alcance longitudinal, tratando-se de um reator de fluxo pistão. Acrescenta-se o fato da potência também refletir diretamente no gasto energético que será discutido a frente.

As diferenças de desempenho analisadas são divididas em:

- Irradiância média disponível
- Tempo de detenção
- Dose de radiação

Como já elucidado, um dos dois termos da equação que resulta na dose UV transmitida, é o tempo de detenção. Este período de exposição é mais facilmente calculado e já pode ser ilustrado para que se introduza a diferença entre as duas configurações. Na Figura 20 percebe-se claramente a diferença entre os períodos calculados, já é possível, a priori, eleger o reator com vertedor como favorito, visto o superior tempo de detenção alcançado reflexo do represamento da água em função da saída ser através de um vertedor a 4 cm do fundo.

O reator de 8 W com vertedor (comprimento útil de 30 cm), obteve teoricamente tempo de detenção superior ao reator de 30 W sem vertedor, o qual tem comprimento útil três vezes maior. De modo geral os tempos de detenção para o reator com vertedor ficaram bem superiores como observa-se em escala logarítmica na Figura 20.

Posteriormente são apresentados os resultados referentes ao comportamento da dose recebida pela porção de água A ou B exposta a radiação emitida pela lâmpada. Os valores de doses transmitidas estão na forma de gráficos separados por potência das lâmpadas e plotados tendo como variável independente a vazão. São expostos valores de

dose no fundo do escoamento e no meio para elucidar o efeito da absorvância na atenuação da radiação germicida.

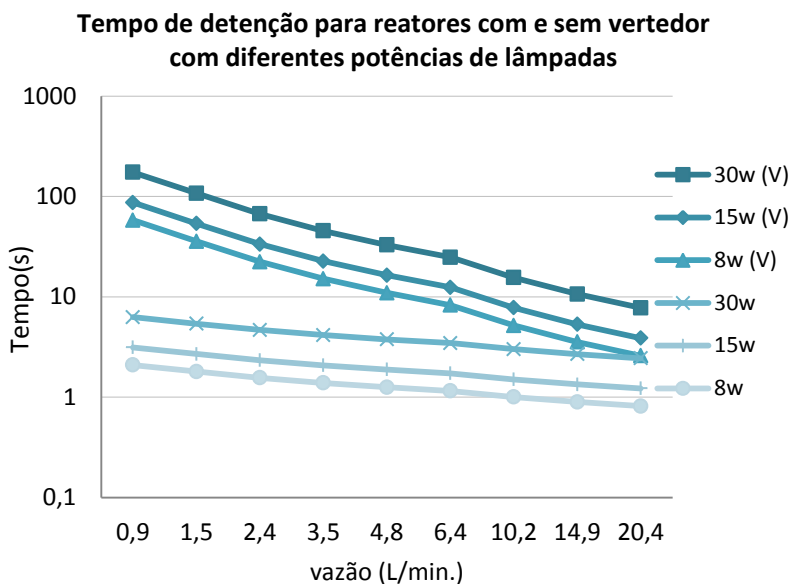


Figura 20 - Tempo de detenção para reatores com vertedor (representados pela letra V) e sem vertedor em função da vazão (L/min.) e da potência (W) das lâmpadas.

#### 4.1.1 Resultados para reator de saída SEM vertedor

O cálculo da dose transmitida para esta tipologia de reator foi realizado considerando a altura total da lâmina de água. Esta consideração foi feita, pois no escoamento sem vertedor, a lâmina de água alcança altura de no máximo 2 cm para uma vazão de 20 L/min (teórico), já bem superior as vazões selecionadas.

Este fato, referente a baixa altura de água encontrada no reator sem vertedor, motivou a análise do reator em questão, pois com uma lâmina pouco espessa a atenuação da radiação pela absorvância é menor, desta maneira podemos supor que o desempenho para águas com esse

parâmetro mais acentuado seja melhor e compense o tempo de detenção menor comparado ao outro tipo de reator. Na sequência é apresentado nas Figura 21, Figura 22, Figura 23 os diferentes resultados em função da potência e vazão dos reatores.

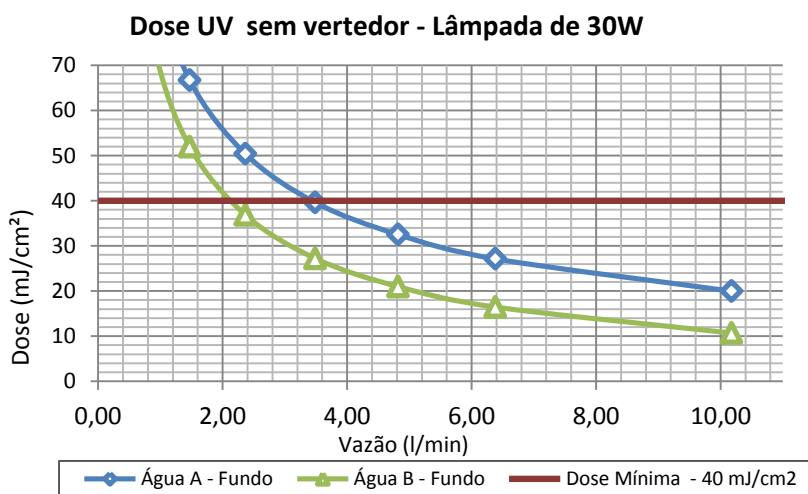


Figura 21 - Dose transmitida em função da vazão e e coeficiente de absorção para reator sem vertedor com lâmpada de 30W.



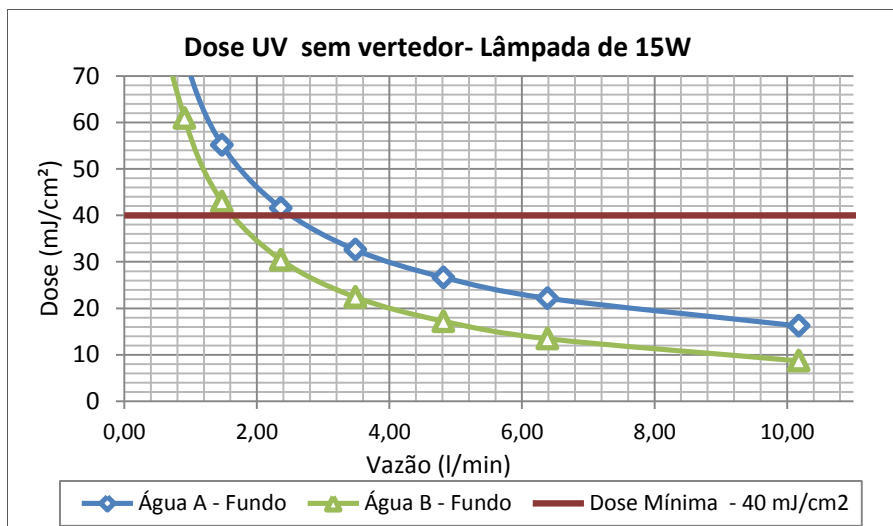


Figura 22 - Dose transmitida em função da vazão e e coeficiente de absorção para reator sem vertedor com lâmpada de 15W.

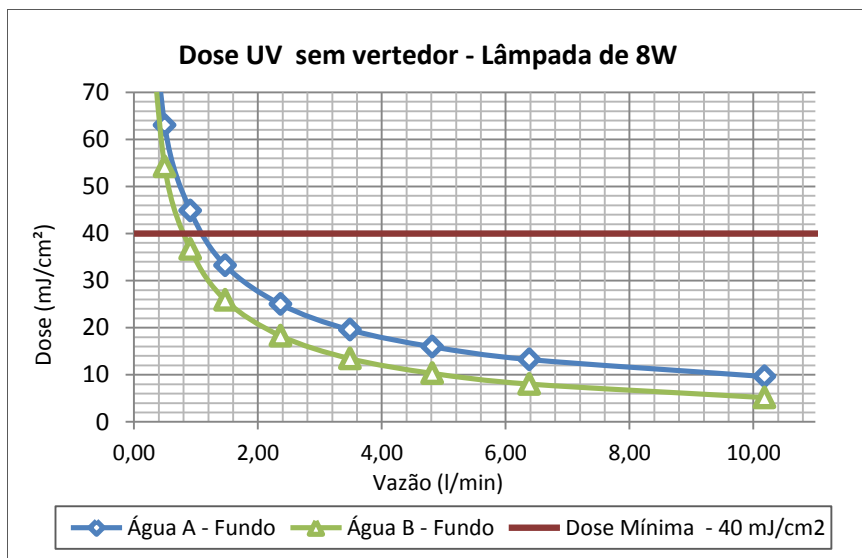


Figura 23 - Dose transmitida em função da vazão e coeficiente de absorção para reator sem vertedor com lâmpada de 30W.

A faixa vermelha em destaque nos gráficos representa a dose mínima de 40 mJ/cm<sup>2</sup> aconselhada pela EPA para uma segura desinfecção. Outras referências apresentam valores um pouco inferiores, e de forma geral como é possível ver na Figura 15 – Dose-Resposta UV Dose para diferentes categorias de microrganismos. (COHN, 2002) com doses menores consegue-se atingir níveis de redução consideráveis para uma grande gama de microrganismos. Esta linha foi utilizada como método para facilitar a comparação e diferenciação entre as doses alcançadas.

Através dos gráficos pode-se verificar qual dose é atingida para cada vazão aplicada. Identifica-se para cada um dos tipos de água a vazão limite para que se alcance a dose mínima desejada. A altura da lâmina de água nesta configuração é pequena, mas já é considerável a ação da absorbância nos resultados. No reator com lâmpada de 30 w, por exemplo, devemos diminuir em 40% a vazão para que se atinja a mesma dose em questão. É importante destacar que para cada vazão

aplicada, nesta configuração que não impõe limite para o nível de água, além da altura da lâmina, a área de exposição é modificada.

Na Figura 24 é apresentado o resumo das vazões limites para alcançar a dose mínima no reator sem vertedor para cada potência de lâmpadas e a diferença do coeficiente de absorção, como já explicado anteriormente.

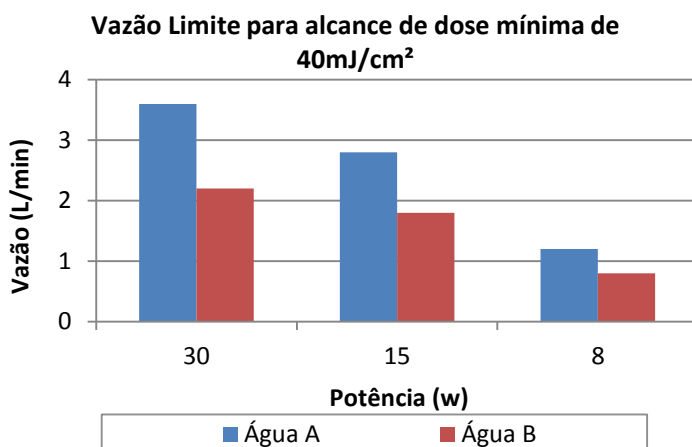


Figura 24 - Vazões limites para cada alcance de dose mínima de 40mJ/cm² no reator sem vertedor, considerando a variação de potência das lâmpadas e da qualidade da água.

#### 4.1.2 Resultados para reator de saída COM vertedor

Esta configuração possui a característica que força o nível da lâmina de água dentro do reator ser fixa (com pequena variação). A saída possui um vertedor que só permite a evasão da água a uma altura de 4 cm. Este valor foi utilizado como altura fixa da água, permitindo calcular o volume de água retido e realização do cálculo do tempo de detenção. O Td encontrado, como já mostrado anteriormente foi maior, resultando em valores de Dose de radiação (intensidade de radiação x tempo de exposição) mais acentuados.

Nas Figura 25, Figura 26, Figura 27 são mostrados os resultados para o reator com vertedor para as potências de 30, 15 e 8W respectivamente. Para esta configuração optou-se por apresentar os valores das doses alcançadas em duas diferentes alturas de lâmina d'água (2 e 4 cm). Os valores do coeficiente de absorção para os dois tipos de água foram mantidos em 0,3 e 0,8  $\text{cm}^{-1}$  para a correta comparação com a tipologia apresentada anteriormente.

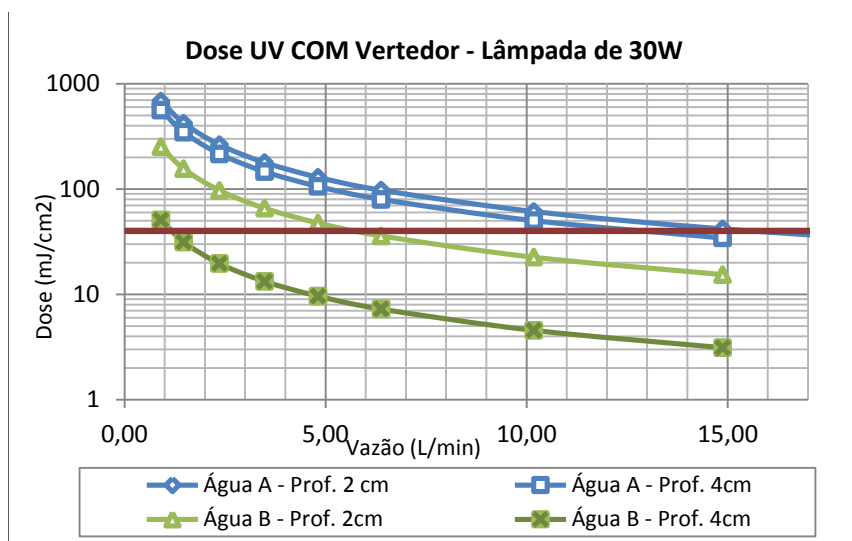


Figura 25 - Dose transmitida em função da vazão e coeficiente de absorção para reator com vertedor com lâmpada de 30W.

Com essa abordagem foi possível verificar de forma mais clara a atenuação da radiação UV a partir do coeficiente de absorção. Nota-se que em uma água com potencial de atenuação pequeno, água A em azul, com coeficiente de absorção de 0,3, a diferença de dose na cota de 2 e 4 cm não é tão acentuada. Observando o efeito ocorrido na água com poder de atenuação maior comprova-se que seu efeito é crítico e deve ser considerado.

Pensando de modo conservador, poderíamos considerar apenas a dose entregue no fundo do reator. Desta maneira estaríamos supondo

que o comportamento hidráulico seguiria a teoria de um reator clássico de fluxo pistão, na prática o líquido é misturado e a dose entregue a 2 cm (meia seção) pode ser considerada a dose média transmitida ao volume de água.

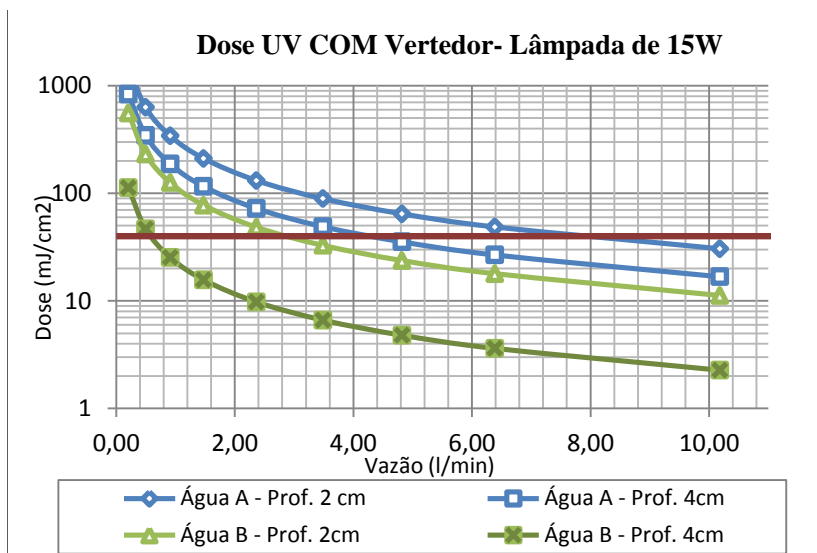


Figura 26 - Dose transmitida em função da vazão e coeficiente de absorção para reator com vertedor com lâmpada de 15W

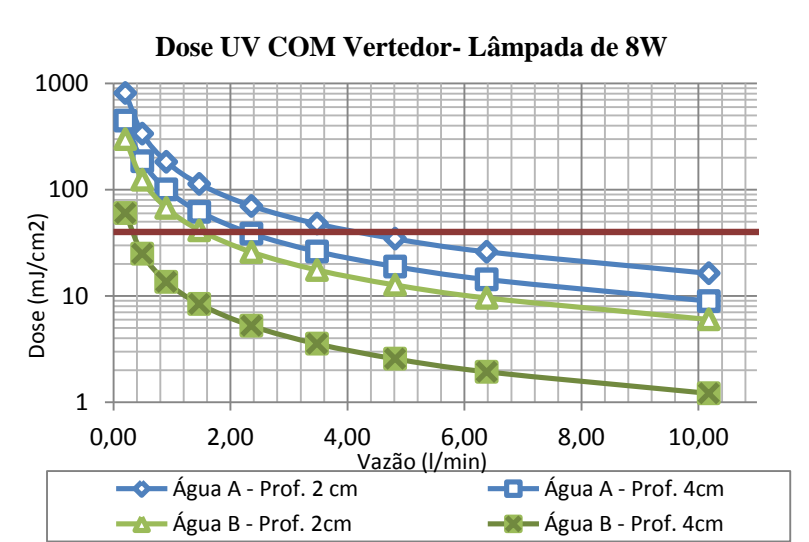


Figura 27 - Dose transmitida em função da vazão e coeficiente de absorção para reator com vertedor com lâmpada de 8W.

Para os reatores com potência de 15 e 8 W obteve-se doses menores, como esperado, o resumo e comparação dos resultados é ilustrado na Figura 28. As vazões plotadas para cada potência de lâmpada são capazes de entregar 40 mWs/cm<sup>2</sup> a uma profundidade de 2 cm, altura média da coluna de água encontrada no reator. É reforçado, feita a análise destes resultados, a necessidade de atentar para o uso de águas com potencial atenuante mais elevado. A vazão para uma água de melhor qualidade representada pela cor azul no gráfico pode ser o dobro para que se entregue a mesma dose de uma água com características atenuantes mais intensas.

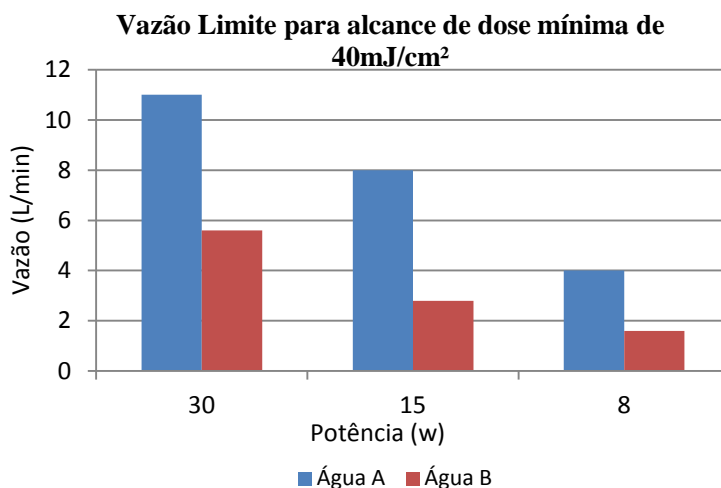


Figura 28 - Vazões limites para cada alcance de dose mínima de  $40\text{mJ}/\text{cm}^2$  no reator com vertedor a profundidade de 2cm, considerando a variação de potência das lâmpadas e da qualidade da água.

É nítida a diferença entre o desempenho dos dois reatores feita a análise dos resultados teóricos. Verificou-se que o maior tempo de detenção representado pelo reator com vertedor foi significativamente representativo nos valores encontrados. O reator com melhor desempenho teórico tem como revés a possibilidade de atenuação da radiação através da lâmina de água. Este fenômeno, no entanto, não foi forte o suficiente, para ter-se um desempenho inferior. Esta variável, todavia, pode ser identificada na Figura 29, onde percebe-se a redução da diferença entre as doses dos dois protótipos quando é simulado o processo com uma água de absorbância mais acentuada (água B). O reator com vertedor apresenta desempenho superior mesmo se utilizada uma água com coeficiente de absorção mais acentuado o que fica nítido pela figura a seguir.

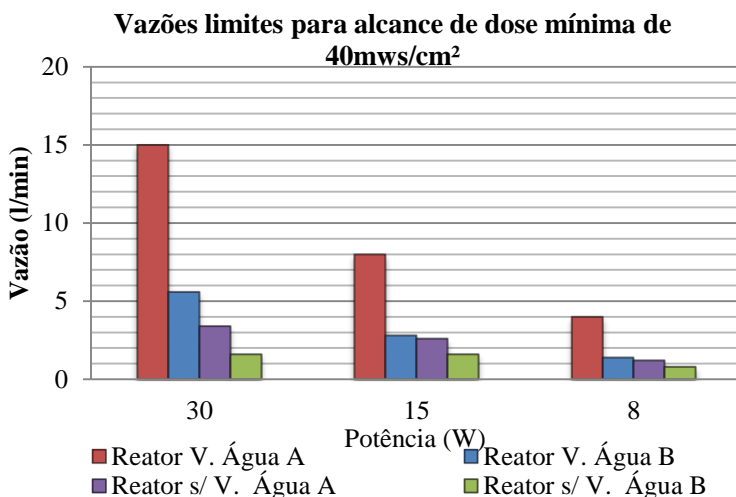


Figura 29 - Comparação de dose atingida entre os dois reatores.

#### 4.2. Resultados Experimentais para Caracterizar o Desempenho do Reator

Como já apresentado nos resultados teóricos há uma importante diferença entre a configuração que apresenta a saída com vertedor, permitindo o represamento da água dentro do reator e a outra onde a saída é livre. A presença do vertedor reflete diretamente no tempo e área de exposição da água à radiação UV, a segunda configuração leva desvantagem em relação a estes fatores como foi elucidado pelo modelo teórico. Esta configuração teria como ponto positivo, no entanto, a suposta facilidade de manutenção e limpeza, visto que partículas presentes se depositariam de forma menos frequente. Esse fator, motivou a realização de um ensaio biológico comparativo para confirmação.

Em cada ensaio foram determinadas as concentrações de microrganismos na entrada e na saída do reator, permitindo a avaliação da eficiência do processo. As concentrações de microrganismos foram



obtidas através de processo cromogênico, utilizando-se reagentes e cartelas da Tecnologia de Substrato Definido da IDEXX® Laboratories, Inc.

A seguir são apresentados os valores encontrados para os testes práticos realizados. Tomou-se como estratégia a fixação de vazões dentro da faixa elucidada nos cálculos teóricos. Como já citado na metodologia simulou-se diferentes faixas de turbidez com bentonita e a contaminação da água foi realizada por meio da adição de quantidades de esgoto.

Para auxiliar a tomada de decisão foram feitos testes práticos comparativos e os resultados são apresentados a seguir. Buscou-se fazer o teste com parâmetros de entrada semelhantes. Turbidez, cor e absorvância principalmente, bem como as vazões. Esses parâmetros foram obtidos com a adição de esgoto e bentonita alcançando níveis de qualidade bem reduzidos e significativos valores de parâmetros interferentes no processo. Os resultados seguem na Tabela 7 e Tabela 8. As diferenças estruturais são expostas na Figura 30.

Tabela 7 - Resultados para o reator SEM vertedor. Data da coleta 14/9/2011.

Parâmetros de Entrada	Turbidez (NTU)	Cor (PtCo)	Absorbância	Coliformes Totais (NMP/100ml)	E. coli (NMP/100ml)
	28,3	82	0,41	3.523	998

		Resultado		Remoção	
Vazão (L/min.)	Amostras	C. Totais	E. coli	C. Totais	E. coli
5,0	1.1	< 1	< 1	100,00%	100,00%
	1.2	< 1	< 1	100,00%	100,00%

	1.3	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
	2.1	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
<b>10,3</b>	2.2	4	1	<b>99,60%</b>	<b>99,90%</b>
	2.3	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

Tabela 8 - Resultados para o reator COM vertedor. Data da coleta 13/9/2011.

<b>Parâmetros de Entrada</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Cor (PtCo)</b>	<b>Absorbância</b>	<b>Coliformes Totais (NMP/100ml)</b>	<b>E. coli (NMP/100ml)</b>
	30,8	85	0,39	24.192	15.533

Tabela 8 (cont.)

		<b>Resultado</b>		<b>Remoção</b>	
<b>Vazão (L/min)</b>	<b>Amostras</b>	<b>C. Totais</b>	<b>E. coli</b>	<b>C. Totais</b>	<b>E. coli</b>
<b>5,1</b>	1.1	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
	1.2	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
	1.3	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
<b>10,0</b>	2.1	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
	2.2	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
	2.3	< 1	< 1	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

O resultado obtido possibilitou a comparação entre as duas configurações e o reator com vertedor teve o melhor desempenho, como já era esperado. A diferença, no entanto, foi pequena, visto que apenas uma amostra coletada da vazão de 10 L/min do reator sem vertedor teve contaminação remanescente. Para a vazão de 5 L/min as

duas tipologias tiveram redução total dos coliformes. Outra consideração se deve a diferença entre o nível inicial de contaminação. O teste feito no dia 13 de setembro utilizando o reator com vertedor teve como entrada uma água com  $10^5$  NMP/100 ml de coliformes, enquanto o teste realizado no dia seguinte com o outro reator apresentou a concentração de  $10^3$ . Esse fato favorece o reator com vertedor, mas para melhor elucidar o resultado foi realizado mais um teste confirmativo agora utilizando apenas o reator sem vertedor e vazão de 10 L/min com resultados apresentados na Tabela 9.



Figura 30- Fotograficas do reator . (1) entrada comum para as duas configurações expostas. (2) saída com vertedor , (3) saída sem vertedor e (4) interior do tubo.

Tabela 9 - Resultados do teste confirmativo usando reator sem vertedor. Data da coleta 22/9/2011.

Parâmetros de Entrada	Turbidez (NTU)	Cor (PtCo)	Absorvância	Coliformes Totais (NMP/100ml)	Coliformes fecais (NMP/100ml)
	29,3	94	0,41	24192	19560

		Resultado		Remoção	
Vazão (L/min)	Amostras	C. Totais	E. coli	C. Totais	E. coli
10,3	1	3	3	99,99%	99,98%
	2	4	4	99,98%	99,98%
	3	7	3	99,30%	99,70%

Com os resultados agora obtidos confirmou-se o desempenho inferior do reator sem vertedor. Os parâmetros de qualidade de água foram mantidos e a carga contaminante muito se aproximou daquela presente no teste com o reator com vertedor.

Os demais ensaios seguiram com a análise do reator com vertedor. De setembro a novembro de 2011, 6 experimentos foram realizados. Manteve-se a opção de verificar o desempenho em condições desfavoráveis para que indiretamente amostras com parâmetros menos acentuados fossem avaliadas. Buscou-se elucidar experimentalmente a influência dos principais parâmetros interferentes, manteve-se as vazões de 5 e 10 L/min com turbidez entre 30 e 45 com carga contaminante e coeficiente de absorção aumentada. Um resumo de todos os resultados é mostrado na Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios biológicos (reator com vertedor). Eficiência em porcentagem de remoção.

Data	Turbidez NTU	Cor (PtCo)	Abs. calc.	Coef.Abs cm-1	Vazão l/min	Coliformes Totais			E.coli		
						Entrada NMP/100ml	Saida NMP/100ml	Eficiência %	Entrada NMP/100ml	Saida NMP/100ml	Eficiência %
13/09/11	31	85	0,39	0,9	5	>24196	< 1	100%	15533	< 1	100%
13/09/11	31	85	0,39	0,9	5	>24196	< 1	100%	15533	< 1	100%
13/09/11	31	85	0,39	0,9	5	>24196	< 1	100%	15533	< 1	100%
13/09/11	31	85	0,39	0,9	10	>24196	< 1	100%	15533	< 1	100%
13/09/11	31	85	0,39	0,9	10	>24196	< 1	100%	15533	< 1	100%
13/09/11	31	85	0,39	0,9	10	>24196	< 1	100%	15533	< 1	100%
25/10/11	45	320	0,69	1,6	5	141360	>2419	-	20000	< 1	100%
25/10/11	45	320	0,69	1,6	5	141360	>2419	-	20000	< 1	100%
25/10/11	45	320	0,69	1,6	5	141360	>2419	-	20000	1	99,99%
25/10/11	40	250	0,47	1,1	10	155310	>2419	-	3350	< 1	100,00%
25/10/11	40	250	0,47	1,1	10	155310	>2419	-	3350	< 1	100,00%
25/10/11	40	250	0,47	1,1	10	155310	>2419	-	3350	6	99,82%

---

02/11/11	30	132	0,26	0,6	5	>241960	>24196	-	198630	96	99,95%
02/11/11	30	132	0,26	0,6	5	>241960	>24196	-	198630	272	99,86%
02/11/11	30	132	0,26	0,6	5	>241960	>24196	-	198630	151	99,92%
02/11/11	30	132	0,26	0,6	10	>241960	>24196	-	198630	112	99,94%
02/11/11	30	132	0,26	0,6	10	>241960	>24196	-	198630	185	99,91%
02/11/11	30	132	0,26	0,6	10	>241960	>24196	-	198630	178	99,91%

Tabela 11 - Resultados de ensaios biológicos reator com vertedor.  
Indicador E. coli

Data	Turbidez NTU	Cor (PtCo)	Abs. calc.	Coef.Abs cm-1	Vazão l/min	E.coli		
						Log entrada	Log saida	Log redução
13/09/11	31	85	0,39	0,9	5	15533	< 1	4
13/09/11	31	85	0,39	0,9	5	15533	< 1	4
13/09/11	31	85	0,39	0,9	5	15533	< 1	4
13/09/11	31	85	0,39	0,9	10	15533	< 1	4
13/09/11	31	85	0,39	0,9	10	15533	< 1	4
13/09/11	31	85	0,39	0,9	10	15533	< 1	4
25/10/11	45	320	0,69	1,6	5	20000	< 1	4
25/10/11	45	320	0,69	1,6	5	20000	< 1	4
25/10/11	45	320	0,69	1,6	5	20000	1	4
25/10/11	40	250	0,47	1,1	10	3350	< 1	3
25/10/11	40	250	0,47	1,1	10	3350	< 1	3
25/10/11	40	250	0,47	1,1	10	3350	6	2
02/11/11	30	132	0,26	0,6	5	198630	96	3
02/11/11	30	132	0,26	0,6	5	198630	272	3
02/11/11	30	132	0,26	0,6	5	198630	151	3
02/11/11	30	132	0,26	0,6	10	198630	112	3
02/11/11	30	132	0,26	0,6	10	198630	185	3
02/11/11	30	132	0,26	0,6	10	198630	178	3

O resultado mais positivo encontrado foi referente ao ensaio realizado no dia 13/09/11. A água utilizada apresentava 31 NTU de turbidez e um coeficiente de absorção considerável de  $0,9 \text{ cm}^{-1}$  e concentração de E. coli na entrada de  $1,5 \times 10^4$  NMP/100 ml e  $>2,4 \times 10^4$  NMP/100 ml de coliformes totais. Todas as amostras coletadas na saída do reator apresentaram < 1 NMP/100ml, com 4 log de remoção.

---

Observa-se através da Figura 31 que foi alcançada uma significativa redução em um cenário ainda mais desfavorável com 45 de turbidez e coeficiente de absorção 50% maior que o caso anterior. Em 3 amostras apenas uma não atingiu total remoção (99,99%).

No teste realizado 02/11/11 buscou-se elevar de forma significativa a carga contaminante na entrada, foi obtida então uma concentração inicial de  $2 \times 10^5$  NMP/100 ml e turbidez de 30 uT, o coeficiente de absorção atingido, no entanto, foi menor que os outros ensaios citados. A remoção atingida foi inferior que os demais casos mencionados, apresentando redução de 3 log na concentração de *E. coli*. Feita a avaliação destes resultados, verificou-se que a combinação da alta presença de microrganismo e considerável turbidez teve atuação significativa. Neste caso a turbidez não apenas agiu atenuando a radiação, mas realizando a proteção física dos microrganismos. Mesmo o coeficiente de absorção ter sido menor e teoricamente permitido a radiação atingir cotas de profundidade mais baixas, quantidade grande de bactérias conseguiu salvar-se visto a alta concentração de entrada.



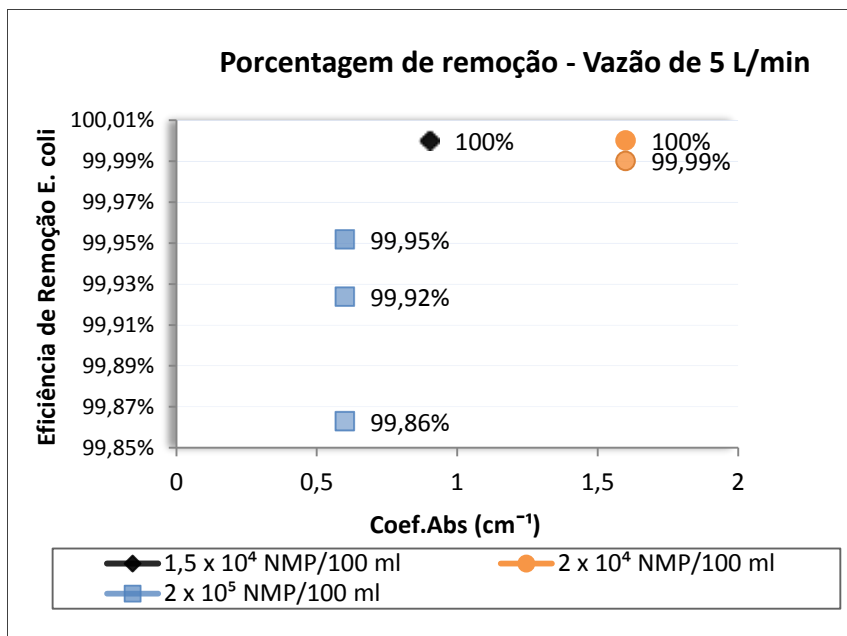


Figura 31 - Eficiência do reator para vazão de 5 L/min em função do coeficiente de absorção e da contaminação inicial de E. Coli.

A Figura 32 resume os resultados com a vazão de 10 L/min. Os valores encontrados não diferem de forma significativa daqueles obtidos com a vazão de 5 L/min. Para o ensaio com carga extrema de coliformes os valores foram muito próximos não sendo possível diferenciação. O caso com contaminação inicial de  $3 \times 10^3$  NMP/100 ml uma das amostras apresentou desempenho inferior.

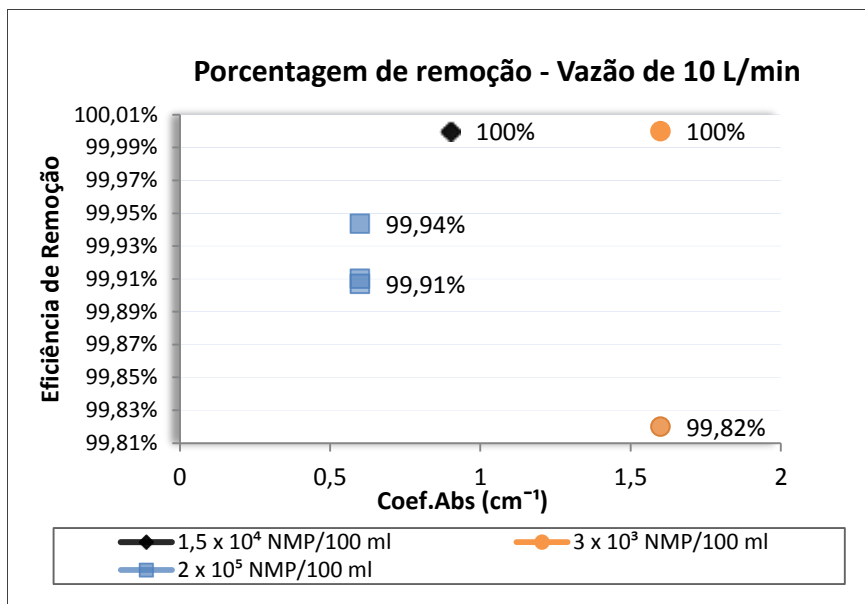


Figura 32 - Eficiência do reator para vazão de 10 L/min em função do coeficiente de absorção e da contaminação inicial de *E. coli*.

Através destes ensaios foi possível provar que uma água com contaminação relativamente alta, normalmente encontrada em rios  $3 \times 10^3 - 10^4$  NMP/100 ml pode ser desinfetada através do reator com apresentado. Verificou-se que a turbidez deve ser moderada pois quando combinada com alta contaminação não permite um ideal efeito germicida.

Fazendo uso dos resultados mais claros encontrados referentes ao ensaio realizado no dia 13/09/11 buscou-se relacioná-lo com os valores calculados no modelo teórico. O gráfico ilustrado na Figura 33 foi gerado através do modelo matemático e mostra o comportamento teórico da dose transmitida a uma água com  $0,9 \text{ cm}^{-1}$ , de coeficiente de absorção, mesmo valor encontrado no teste prático citado anteriormente. Estes valores teóricos expressam a dose transmitida na altura média de água (2 cm), situação que mais se aproxima de uma situação real.

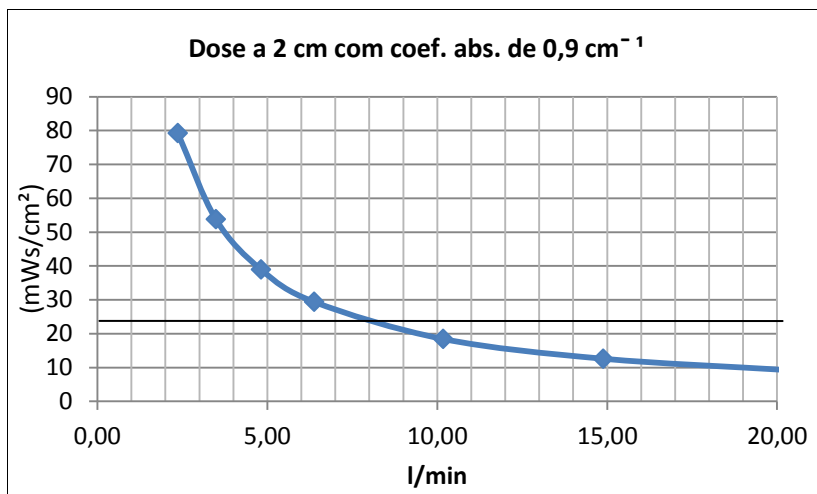


Figura 33 - Comportamento teórico da dose transmitida a uma água com 0,9 de coef de abs na profundidade média em função da vazão.

Analisando o gráfico verifica-se que a dose teoricamente transmitida entre 5 e 10 L/min é de 37 a 20 mWs/cm<sup>2</sup>. Feita a comparação com a Figura 15 – Dose-Resposta UV Dose para diferentes categorias de microrganismos, é possível avaliar se a dose teoricamente transmitida e consequente taxa de desinfecção coincide com os valores obtidos no ensaio biológico. A Figura 15 ilustra que com cerca de 25 mWs/cm<sup>2</sup> atinge-se uma redução de 4 LOGS de *E. coli*. No ensaio do dia 13/09 a redução foi a mesma para a vazão de 10 l/min que teoricamente teve dose entregue de 20 mWs/cm<sup>2</sup>. Confirma-se através destas informações que o modelo produzido revela uma boa proximidade de valores se comparado com a situação real, tendo ainda embutida margem de segurança.

#### 4.3. Sistema fotovoltaico

A seguir apresentam-se o cálculo do consumo de energia elétrica esperado, bem como os índices de rendimento e perda esperados. Por fim mostra-se a potência necessária do arranjo para suprir a demanda de

energia e as especificações elétricas de um módulo pré-selecionado para compor o sistema.

### a. Consumo de energia elétrica esperado

A principal carga consumidora do sistema de desinfecção é a lâmpada germicida, fazem parte também o reator e componentes de controle que posteriormente podem ser instalados (eletroválvula e controle eletrônico). A equação 8 é usada resultando nos valores listados na Tabela 12.

Tabela 12 - Consumo de energia esperado no sistema

<b>CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA ESPERADO</b>				
Item	Cargas	Potência [W]	Tempo de uso [h]	Consumo [kWh]
1	Lâmpada	30	12	360
2	Eletroválvula	5	12	60
3	Reator	5	12	60
4	Controle Eletrônico	1	12	12
$\Sigma =$				492

### b. Recurso solar disponível na localidade

A localidade utilizada como referência para o dimensionamento foi Florianópolis – SC. O comportamento da radiação solar da capital de Santa Catarina é exposta primeiramente na Tabela 13 e depois de forma otimizada considerando a inclinação adequada ( $27^\circ$ ) na Tabela 14 e ilustrado na Figura 34.

Tabela 13 - Radiação diária média mensal em Florianópolis (kWh/m<sup>2</sup>). Desvio azimutal  $0^\circ$  na horizontal.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
6,15	5,44	4,93	4,05	3,37	2,95	3,00	3,65	3,81	4,68	5,49	6,13	4,47

Tabela 14 - Radiação diária média mensal em Florianópolis (kWh/m<sup>2</sup>). Desvio azimutal 0° com inclinação de 27°.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
5,89	5,43	5,18	4,55	4,06	3,68	3,64	4,24	4,04	4,75	5,35	5,82	4,72

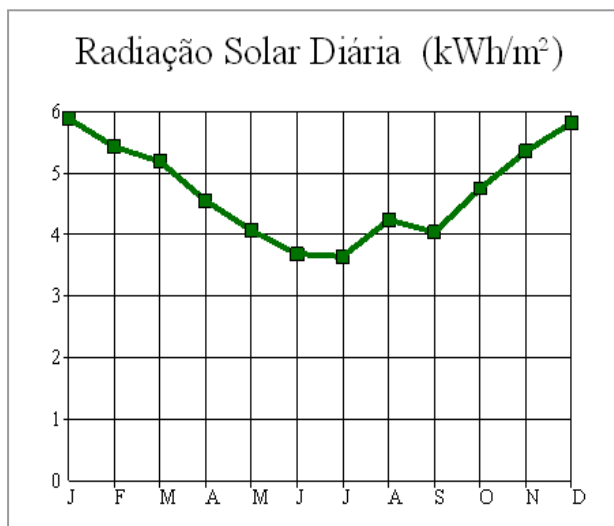


Figura 34 - Comportamento da radiação solar diária (kWh/m<sup>2</sup>) durante o ano em Florianópolis – SC.

Para o dimensionamento de um sistema isolado para alimentar as cargas descritas no item a deve-se considerar a radiação mais baixa do ano. Desta maneira garantimos que o sistema funcione na pior condição solar do ano.

Neste caso a pior oferta acontece no mês de julho sendo de 3,6 kWh/m<sup>2</sup>, este valor é utilizado para o correto dimensionamento do painel fotovoltaicos necessário para suprir a demanda energética calculada no item a.

---

### **c. Dimensionamento do Painel (Potência necessária)**

Para se efetivar o cálculo da potência de pico, ou seja, a potência do painel fotovoltaico temos que além do cálculo da energia diária consumida e da irradiação diária, verificar qual o fator de eficiência do sistema. Este fator foi calculado fazendo uso de um software de simulação de sistemas fotovoltaicos chamado Pvsyst. O valor dado pelo programa para as condições propostas analisa o comportamento relativo ao seguinte diagrama da Figura 35.

Na ilustração em destaque são mostrados os dois possíveis caminhos que a energia pode percorrer: indireto em vermelho, o qual ocorre em dias nublados em que a irradiação disponível não é suficiente para suprir a demanda requerida pela carga, então se faz uso da bateria e em azul ilustrando o caminho direto, quando a energia gerada no módulo é diretamente levada a carga. Os dois percursos devem ser considerados, e cada item do sistema contribui para o somatório das perdas de carga. A estimativa de perdas é apresentada na Tabela 15.

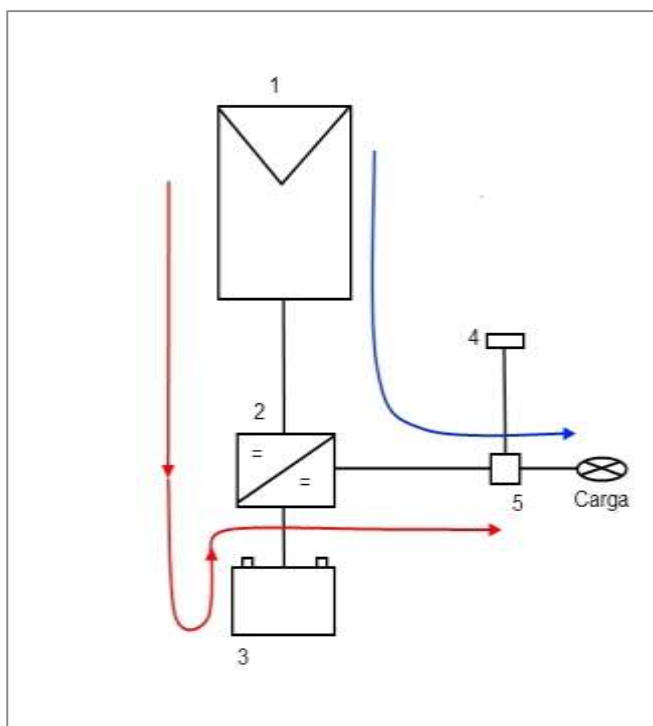


Figura 35 - Diagrama do sistema de alimentação fotovoltaico. No desenho (1)Painel fotovoltaico, (2) Controlador de carga, (3)Bateria, (4) Sensor de luminosidade, (5) Caixa de controle elétrico.

Tabela 15 – Estimativas de perdas em cada item do sistema.  
Fonte: PVsyst

<b>Rendimento [η]</b>	
Painel Fotovoltaico	0,85
<b>C. de Carga c/MPPT</b>	0,95
Bateria	0,76
Cabos	0,9
<b>Fator de Rendimento [η]</b>	
Direto	0,73
Indireto	0,55
Total	0,68

Com os seguintes dados disponíveis pode-se agora calcular a potência necessária:

- Energia Consumida (Wh) = 492 → 0,5 kwh
- Irradiação [GPOA\*] = 3,6
- Fator de Eficiência [η] = 0,68
- Fator de segurança = 20%

$$P_{cc} = (E/G) / \eta$$

$$P_{cc} = (0,5/3,6)/0,68$$

$$P_{cc} = 205 \times 1,2 =$$

$$\underline{\underline{\text{Potência [Wp] = 245 W}}}$$



Fazendo uso do modelo de módulo fotovoltaico descrito na Tabela 16 será necessário compor um arranjo com duas unidades, totalizando em uma potência de 270 W.

Tabela 16- Especificações elétricas e mecânicas do módulo fotovoltaico escolhido para o dimensionamento. Módulo da Kyocera de silício policristalino com as dimensões de 150 x 67cm<sup>2</sup>.

<b>Especificações Elétricas do Módulo (STC)</b>	
Máxima Potência [W]	135W
Potência (STC) por unidade de área	134.7 W/m <sup>2</sup>
Eficiência	13.47%
Voltagem nominal	12V
Corrente de Máxima Potência [A]	7.63A
<b>Tensão de Máxima Potência [V]</b>	<b>17.7V</b>
Corrente de Curto-Circuito [A]	8.37A
<b>Tensão de Circuito Aberto [V]</b>	<b>22.1V</b>
Coefficiente de Temperatura da Potência [ W/°C]	-0.94%/C
<b>Coefficiente de Temperatura da Tensão V<sub>ca</sub> [ V/°C]</b>	<b>-0,08V/C</b>
Tensão Máxima do Sistema [V]	600V

#### **d. Dimensionamento do Acumulador**

O acumulador deve ser dimensionado tendo como base a demanda energética total, pois em dias com oferta solar nula, o banco de baterias deve fornecer a energia necessária para o funcionamento do sistema. As baterias são classificadas de acordo com a sua capacidade de fornecimento de corrente (Ah), ou seja quantos amperes consegue entregar em uma hora de funcionamento. A tensão dos sistema é ditada pela bateria em 12V, sendo assim o cálculo é feito da seguinte maneira:

$$E = P \times t$$

Equação 11

$$500 \text{ Wh} = (U \times i) \times t$$

$$500 = 12 \times i \times t$$

$$i.t = 41,67Ah$$

Com esse valor em um dia continuamente chuvoso, teríamos a carga da bateria extinta. Para evitar esse desgasta que diminui a vida útil do equipamento, é ideal que a descarga seja menor. Neste caso foi escolhido a valor de 30% para a profundidade de descarga. Ou seja, o banco de baterias deve suprir a demanda do protótipo fazendo uso de apenas 30 % de sua capacidade total, garantindo vida útil prolongadas e autonomia em dias continuamente nublados.

$$Ah = 41,67/0,3$$

$$Ah = 138,9$$

#### **e. Controlador de carga**

Para a correta escolha do controlador de carga, deve-se calcular com precisão qual é a real tensão de máxima potência, nas especificações do módulo é apresentado o valor de 17.7V, esta voltagem, no entanto, é variável de acordo com a temperatura de operação usual do módulo e seu coeficiente de temperatura.

Considerou-se um  $\Delta T$  em relação à  $T_{amb}$  (25 °C) de 30°C, desta forma a Nova Tensão de Máxima Potência [V] foi calculada em 15,78 V através da Equação 11.

O controlador de carga deve, desta forma, regular a tensão da saída dos módulos para a tensão da → bateria, apresentando uma capacidade ou eficiência mínima de 76% (15,8→12).

---

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema estudado, baseado na aplicação de radiação UV, apresentou boa eficiência na inativação de *E. coli*. Considerando a utilização de uma vazão constante de 5 l/min operando 12 horas por dia, é possível fazer a desinfecção de 3.600 litros neste período, um número relevante, através de uma solução de instalação relativamente rápida.

O modelo matemático desenvolvido contribuiu de forma adequada para a tomada de decisão referente às faixas de vazão utilizadas nos testes práticos bacteriológicos. Foi também um importante instrumento para compreender o comportamento da dose entregue reflexo dos respectivos parâmetros de entrada interferentes no processo. Em termos de interdependência entre variáveis, cabe observar que se pretendeu neste estudo constituir uma relação entre os resultados de inativação e a variação dos parâmetros de qualidade de água trabalhados, no entanto, essa correspondência mostrou-se evidente, porém não estável.

Ao se estabelecer um sistema de desinfecção UV, fica evidente a necessidade de se atuar de forma abrangente a caracterização físico-química e microbiológica da água e a avaliação da permanência destes parâmetros em termos sazonais. A relação dos sólidos no processo não foi avaliada de forma mais aprofundada, mas foi possível verificar indiretamente sua relação com a eficiência e segurança do reator. É possível admitir que a presença de sólidos é capaz de proteger os microrganismos da ação do desinfetante.

Os resultados obtidos sustentam a boa perspectiva de emprego de sistemas de desinfecção baseados na aplicação da radiação UV como agente desinfetante, mesmo aplicados em águas com cor e turbidez mais acentuadas. Tivemos remoção total de *E. coli* com 4 log de redução para as vazões trabalhadas com condições de qualidade reduzidas indicando potencial de segurança para águas mais limpas (poços por ex.) alvo de uma futura implementação do protótipo.

O sistema fotovoltaico dimensionado pode ser facilmente replicado e os itens comprados no Brasil. Representa uma adequada alternativa para essa solução de desinfecção. A lâmpada instalada no reator reagiu perfeitamente quando alimentada com a tensão que seria entregue com a instalação do sistema fotovoltaico alimentador.

---

Com relação à análise em termos de eficiência, é necessário enfatizar que a inativação de *E. coli* não determina a segurança do sistema como barreira sanitária. Devem ser alvo de verificação, desta maneira, não apenas microrganismos patogênicos de maior resistência ao processo de desinfecção por radiação UV, tais como vírus e cistos de protozoários, como também, outros cujas dimensões causem um maior efeito de proteção exercido pelas partículas dispersas na água à ação da radiação UV.

O reator UV estudado proporciona um equilíbrio entre a eficácia técnica, disponibilidade local de peças, facilidade de acessibilidade, uso e recurso. Embora os resultados do ensaio biológico não são capazes de precisar a dose fornecida, eles mostraram um consistente desempenho. A Dose prevista pelo modelo é coerente com a irradiância que é indicada pelo ensaio biológico. O tubo de PVC com calha superior de alumínio oferece um bom equilíbrio entre viabilidade técnica, adequação e considerações de baixo custo, baseado em resultados do modelo, bioensaios e os custos de materiais.

---

## 6. REFERÊNCIAS

AGUIAR, Alex Moura de Souza. **Avaliação do emprego da radiação ultravioleta da desinfecção de águas com cor e turbidez moderadas.** 2000. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

BASTOS, R. K.; Heller, L.; Prince, A. A.; Brandão, C. C. S.; Costa, S. Manual de Boas Práticas no Abastecimento de Água: procedimentos para a minimização de riscos à saúde (versão preliminar). FUNASA/OPAS, 2003

BASTOS, R.K.X. (1999). Controle e vigilância da qualidade de água para consumo humano. FNS/UFMG/UFV. 184p. (apostila)

BLATCHLEY, E. R. I. (1997). "Numerical Modelling of UV Intensity: Application to Collimated- Beam Reactors and Continuous-Flow Systems." Water Research 31(9): 2205-2218.

BLATCHLEY, E. R. I., Z. Do-Quang, M.-L. Janex and J.-M. Laîné (1998). "Process Modeling of Ultraviolet Disinfection." Water Science and Technology 38(6): 63-69.

BOLTON, J. R. (1999). Ligth compendium: ultraviolet principles and applications. EPA – Newsletter, n66, p 9-37.

BRASIL. Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica. .. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Disponível em: <[www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/3\\_2.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm)>. Acesso em: 24 jun. 2011.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento.** 3. ed. rev. - Brasília: Ministério da saúde, 2006. 408 p.

COHN, Alicia. **The UV-Tube as an Appropriate Water Disinfection Technology:** An Assesment of Tecnical Perfomance and Potential for Dissemination. 2002. 60 f. Dis (Dissertação) - University Of California, Berkeley, Berkeley, 2002.

---

CRAUN, G.F. **Balancing the microbial and chemical risks in drinking water disinfection.** Washington, ILSE Press. 211p.1996

CRAWFORD, Mary H. et al. Final LDRD Report: **Ultraviolet Water Purification systems for Rural Enviroments and mobile Applications.** Livermore, California: Sandia National Laboratories, 2005.

DANIEL, Luiz Antonio et al. (Org.). **Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável.** São Carlos: 2001. 149 p. (Publicação do Programa em Saneamento Básico (PROSAB) INSTITUIÇÕES PARTICIPANTES EESC-USP, UFRGS, UnB, Unicamp, UFMG).

DI BERNARDO, L. (1993) **Métodos e técnicas de tratamento de água.** vol. 2, ABES, rio de Janeiro, Brasil, 503p.

EPA (1999). **Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual,** United States Environmental Protection Agency, Office of Water: 346.

GUIMARÃES, A. P. C., Ribeiro C. M., Bastos L. E. G., Valente L. C. G, P. C. D. Silva, e Oliveira R. X. D., "**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos,**" CEPEL - CRESESB, 2004.

JARDIM, C. S.; RUTHER, R.; SALAMONI, I. T.; VIANA, T.; REBECHI, S. H.; KNOB, P. The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 40, p. 365-370, 2007.

JULIUS, A. A. and SAWYER, S. M. **Control Systems Challenges in Energy Efficient Portable UV Based Water Sterilizer.** Nova York: Rensselaer Polytechnic Institute Troy, 2010.

KHAN, Asif. **A bug-beating diode.** *Nature*, n. 441, p.299, 18 maio 2006.

KHAN, Asif. **A bug-beating diode.** *Nature*, n. 441, p.299, 18 maio 2006.

---

KNIGHT G. “**Monitoring of ultraviolet light sources for water disinfection**, in ” *Proc. IEEE Industry Application Conf.*, vol. 2, pp. 1016–1018, 2004.

KOWALSKI, Wladyslaw. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. Heidelberg and Berlin: Springer, 2009.

LINDEN, K.G., Rosenfeldt, E.J. – Ultraviolet Light Processes. In: AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION. Water Quality & Treatment: A handbook on drinking water. 6ª edition. Denver: Mc Graw Hill, 2011. Cap. 18, p. 1-36.

LINDSETH I., Bardalb A., Spoorenb R. **Optics and Lasers in Engineering**, Volume 32, Issue 5, November 1999, Pages 419-435,

MEYER, Sheila T. **O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública**. Cad. Saúde Pública., Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, 1994

NOGUEIRA, Giovani, NAKAMURA, Celso V, TOGNIM, Maria CB et al. Qualidade microbiológica de água potável de comunidades urbanas e rurais, Paraná. Rev. Saúde Pública. [online]. 2003, vol. 37, no. 2 [citado 2007-03-30], pp. 232-236.

OMS (Small community water supply management. Disponível em: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/smallcommunity/en/index.html#](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/smallcommunity/en/index.html#)>. Acesso em: 11 abr. 2011.

OMS, “**How does safe water impact global health?**.” Disponível online <http://www.who.int/features/qa/70/en/index.html>, 2008. Acesso em 23/05/2011.

OMS, **Drinking-water quality**. Disponível em: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/). Acesso 20/06/2011.

OMS, **Health-related Millennium Development Goals and Targets**. Disponível em: [http://www.who.int/gho/mdg/goals\\_targets/en/](http://www.who.int/gho/mdg/goals_targets/en/). Acesso em 20/06/2011.

---

PÁDUA, Valter Lúcio de. **Tratamento de águas de abastecimento**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Ufmg Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 181 p. Apostila.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L. e RÜTHER, R. - **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, INPE, 2006

PUNPENG, Twisuk. **Environment and Health Decision-Making**. Disponível em: <<http://www.who.int/heli/decisions/presentationnotes010305.pdf>>. Acesso em: 21 junho de 2011.

RICHTER, Carlos A. & NETTO, José M. de Azevedo, **Tratamento de água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis, 2004

SALAMONI, Isabel Tourinho. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. 200 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Ufsc, Florianópolis, 2009.

SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte,, 2009.

SHAH, A.; Meier, J.; Tscharner, R. & Wyrsh, N. [1992] **Photovoltaic Power Generation**, Plasma Physics & Controlled Fusion, vol. 37.

SHI, Penghui; HU, Hongwei. **Research of Drinking Water Disinfection Technology**. Pingdingshan, China: Henan University of Urban Construction China, 2010.



---

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. – Diagnóstico. Ministério das Cidades – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental [www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br) Acesso em 15 de out. de 2011.

SOMMER, Regina. **Disinfection of Drinking Water by UV Irradiation: Basic Principles** - Specific Requirements - International Implementations. **Ozone: Science And Engineering**, Vienna, p. 43-48. jan. 2008.

Standard Methods for Water and Wastwater, 21TH Edição de 2005

UNCROPERA F.P., De Witt D.P. **Introduction to heat transfer** 4<sup>th</sup> Editon, pg. 752, 2001 Reflectance next term measurements of previous termaluminium next term surfaces using integrating spheres

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbana**: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade. 2010. 189 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

UVLIFE (Brasil). **O que é UVC?** Disponível em: <[http://www.uvlife.com.br/o\\_que\\_e\\_uvc\\_.html](http://www.uvlife.com.br/o_que_e_uvc_.html)>. Acesso em: 15 jun. 2011.

WEKHOF, A., TROMPETER, F. J. and FRANKEN, O. “**Pulsed UV disintegration (PUVD)**: a new sterilisation mechanism for packaging and broad medical-hospital applications,” in *Proc. 1st Int. Conf. on Ultraviolet Technologies*, 2001.

WITT, V. M., REIFF, F. M. **Tecnologías de desinfección del agua para comunidades pequeñas y zonas rurales**. In: La Calidad del Agua Potable en América Latina – Ponderación de los Riesgos Microbiológicos contra los Riesgos de los Subproductos da la Desinfección Química. Washington, D.C.: ILSI Press / Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la Salud., p.153-185, 1996.

ZILLES, R.; OLIVEIRA, F. H. S. **6,3kWp Photovoltaic Building Integration at São Paulo University**. In: 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munique, Alemanha, 2001.

## 7. APÊNDICES

Código do modelo matemático:

$= \Delta t \times [(Radição\ direta + Radição\ refletida) \times Absorção\ através\ da\ lâmina\ d'\ água] \div (Área\ superficial)$

$= [(\acute{A}rea\ T.\ x\ L) / Q] \times \{ (F_{ij} \times Pot \times \acute{r}) + [(F_{ji} \times Pot \times \acute{r}) \times (1-\alpha)] \} \times EXP(-\acute{a} \times h) \div (D \times L)$